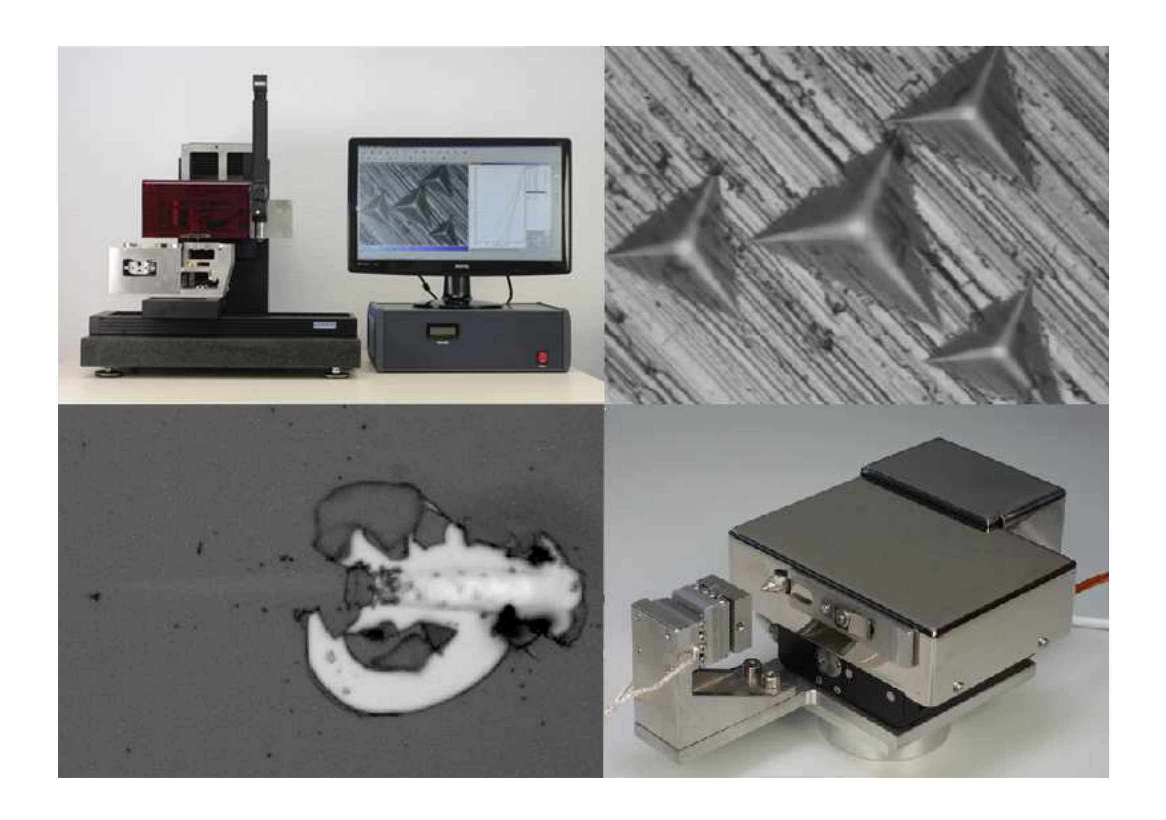


IndentAnalyser

Version 3

Bedienungsanleitung



Letzte Überarbeitung: 9. April 2014

Haftungsausschluss

Alle Handelsmarken in dieser Bedienungsanleitung sind Eigentum des jeweiligen Besitzers und werden hiermit anerkannt.
Die hier gelieferten Informationen wurden mit Sorgfalt zusammengestellt. Ungeachtet dessen wird keine Garantie zu Vollständigkeit und Richtigkeit gegeben oder impliziert.
Die ASMEC GmbH ist nicht verantwortlich für Schäden die dadurch entstehen, dass die Hinweise dieser Anleitung nicht berücksichtigt oder missachtet werden.
Sollte ein Problem auftauchen zu dem diese Anleitung keine Anweisungen enthält oder zu dem die Anleitung missverständlich erscheint, bitten wir Sie, unseren Service zu kontaktieren:

service@asmec.de

ASMEC Advanced Surface Mechanics GmbH
Bautzner Landstraße 45, 01099 Radeberg OT Rossendorf
Geschäftsführer: Dr. Jan Stefan Roell
Prokuristen: Dr. Thomas Chudoba, Ronald Schließer
Handelsregister Dresden, HRB 22387
USt-IdNr.: DE 813898987

Tel.: +49 (0)351 2695 345
Fax: +49 (0)351 2695 346
E-Mail: info@asmec.de
Internet: www.asmec.de

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung

Diese Bedienungsanleitung soll Ihnen die Nutzung der Software IndentAnalyser erleichtern. Verschiedene der beschriebenen Module sind nicht immer verfügbar. Die Voraussetzungen zur Nutzung der Module sind im Allgemeinen vermerkt. Der Funktionsumfang der Software hängt von den erworbenen Software-Modulen ab.

Die Bedienungsanleitung setzt Grundkenntnisse in der der Bedienung von Computern unter dem Betriebssystem Windows 7 oder höher sowie einige Kenntnisse der englischen Sprache voraus, da die Benutzeroberfläche nur in Englisch zur Verfügung steht. Auf eine Erklärung von Fachbegriffen, die im Englischen und Deutschen ähnlich lauten, wird in der Regel verzichtet.

Die Abbildungen wurden mit einer Version 3.0.4 von IndentAnalyser oder höher erstellt. In neueren Versionen können eventuell Abweichungen von diesen Abbildungen auftreten, die aber keinen Einfluss auf die generelle Bedienung haben.

Sind mehrere Eingabefelder in einem Fenster vorhanden, so werden die Werte in der Regel übernommen, wenn die Tabulator-Taste gedrückt wird. Die Enter-Taste kann nur in einigen ausgewählten Fällen verwendet werden.

Die Software ist geeignet für die Auswertung von tiefenempfindlichen Messungen der Härte und des E-Moduls für eine Vielzahl verschiedener Messgeräte vom Nano- bis zum Makro-Bereich entsprechend dem internationalen Standard ISO 14577. Mit einem Zusatzmodul lassen sich mit Hilfe von neuronalen Netzen Spannungs-Dehnungs-Kurven von Metallen ermitteln. Für einige Geräte lassen sich auch dynamische Messungen (CSM / QCSM Mode) auswerten. Außerdem können mit IndentAnalyser alle Messverfahren ausgewertet werden, die sich mit den Geräten von ASMEC ausführen lassen, insbesondere solche unter Verwendung der Lateralkrafteinheit als zweitem Messkopf. Dies betrifft beispielsweise Mikro-Scratchtests, Mikro-Verschleißtests oder Oberflächenscans.

2 Programmstart und erste Schritte

2.1 Start des Programms als Testversion

Das Programm wird nach der Installation als Testversion starten, die nur das Öffnen von bereits vorher ausgewerteten Datenfiles in den programmeigenen Formaten **DAA** und **AVR** zulässt. Die originalen Datenfiles der Messgeräte (üblicherweise **DAT**-Files) lassen sich nicht öffnen. Dies wird durch die Worte **Trial Version** in der Kopfzeile gekennzeichnet.

Das Programm hat einen Kopierschutz, der auf der Nummer der Festplatte bzw. Partition (Disk ID no.) basiert, auf der es installiert ist. Das Programm kann als zeitlich befristete Vollversion getestet werden. Dafür sind eine Registrierung und die Anforderung eines Freischaltcodes erforderlich.

Beim Start einer Trial Version erscheint das Fenster **Welcome** (Abb. 1). In diesem Fenster wird rechts unten die Disk ID no. des Rechners angezeigt. Um den Freischaltcode für eine zeitlich begrenzte Vollversion zu erhalten oder um ein Angebot zur Lizenzierung der Software anzufordern, schicken Sie diese Nummer per E-Mail an den Lieferanten oder ASMEC. Dies geht am einfachsten durch Anklicken der E-Mail Adresse **info@asmec.de** im Welcome Fenster. Danach öffnet sich das E-Mail Programm (sofern es installiert ist) und die vorbereitete E - Mail braucht nur ergänzt und abgeschickt werden.

Sollte die Festplatte neu formatiert oder die Software auf einem neuen Rechner installiert werden ist ebenfalls ein neuer Freischaltcode erforderlich.



Abb. 1: Begrüßungsfenster mit Nutzugsinformationen und automatisch angezeigter Disk-ID

Der Zugangscode ist in das Eingabefeld *Software access code* des Fensters **Configuration** (siehe **Kapitel 3.3.1**) einzutragen (Abb. 2).

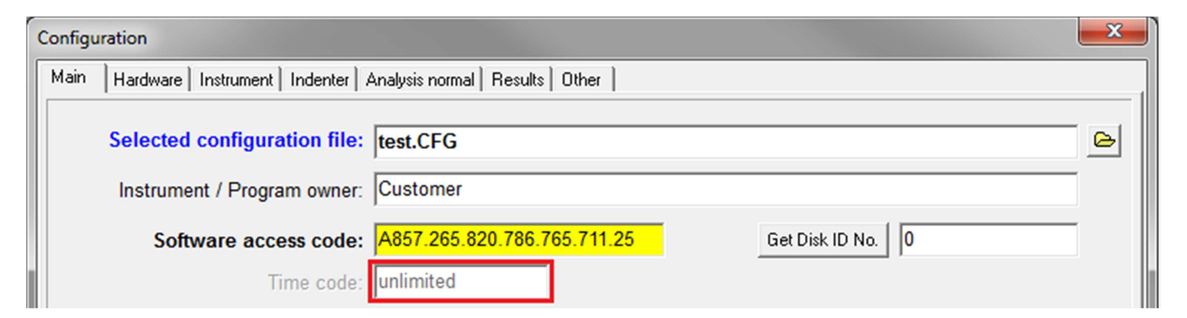


Abb. 2: Konfigurationsfenster mit den Feldern für Software access code (gelb) und Time code (roter Kasten)

Für die Vollversion wird der *Software access code* benötigt, bei dem jeweils drei Ziffern durch einen Punkt separiert sein müssen. Für einen zeitlich befristeten Test der Vollversion wird außerdem der **Time code** benötigt. Die verbleibende Zeit für den Test wird nach Neustart der Software im **Welcome** Fenster angezeigt.

2.2 *Erste Schritte*

Der Start des Programms erfolgt durch Klick auf das Symbol von IndentAnalyser im Programmmenü oder auf dem Desktop. Das Programm startet automatisch, wenn auf eine Datei im programmspezifischen AVR-Format geklickt wird. Im Dateimanager sollte bei diesem Dateityp das gleiche Symbol zu sehen sein.

Vor der ersten Nutzung des Programms sind einige Schritte erforderlich, um das Programm für die Nutzung von gerätespezifischen Daten vorzubereiten.

2.2.1 Individuelle Konfiguration

Beim Start des Programms werden bestimmte Parameter geladen, die die Nutzung des Programms festlegen. Ein großer Teil der Parameter steht in so genannten **Configuration Files (CFG)**. Diese Files stehen normalerweise in einem separaten Verzeichnis mit dem Namen **CFG-Files** eine Ebene unterhalb des Programmverzeichnisses. Nur von dort werden sie beim ersten Programmstart automatisch gelesen. Später können auch andere Verzeichnisse für diese Files gewählt werden. Wird das File beim Programmstart nicht gefunden, erscheint eine Fehlermeldung und die Aufforderung, ein Configuration-File einzulesen. Ein einmal gelesenes File, das im Verzeichnis **CFG-Files** steht, wird beim Programmstart immer wieder eingelesen bis ein anderes ausgewählt wird.

Der Typ des Gerätes von dem die Messdaten stammen als auch der Typ der Messspitze und die Art der Auswertung werden in den CFG-Files festgelegt. Nach dem ersten Start des Programms ist ein CFG-File einzulesen, das zu dem Gerätetyp gehört, von dem Daten ausgewertet werden sollen. Für die meisten Gerätetypen werden Files mitgeliefert, die den Namen des Gerätes enthalten. Dies geschieht mit der 

Open CFG Schaltfläche im Hauptmenü. Eine andere Möglichkeit, das Gerät auszuwählen gibt es im Configuration Fenster auf der Seite Instrument. Es wird mit Schaltfläche **Configuration** Configur. im Hauptmenü geöffnet. In den mitgelieferten CFG-Files sind Indenter-Typen und deren Kalibierwerte festgelegt, die nicht mit denen des neu gewählten Gerätes übereinstimmen werden. Daher ist für eine genaue Auswertung von Härte- und E-Modul-Werten eine Kalibrierung unbedingt erforderlich. Zur Nutzung des Configuration-Fensters siehe Kapitel 3.3.

2.2.2 Messungen an Referenzmaterialien zur Kalibrierung

Für genaue Auswertungen sind die Flächenfunktion des Indenters und die Gerätesteife zu kalibrieren. Dazu sind Messungen an zwei Referenzmaterialien mit verschiedenen Kräften durchzuführen. Es wird empfohlen, Quarzglas oder ein anders Glas zur Ermittlung der Flächenfunktion und Saphir oder ein anderes Material mit großem Elastizitätsmodul zur Bestimmung der Gerätesteife zu verwenden. Für die ersten Kalibriermessungen können die Gerätesteife- und Indenter-Flächenfunktion verwendet werden, die mit dem Programm mitgeliefert wurden. Diese Funktionen können später geändert werden. Die Kalibrierung ist im Kapitel 6 beschrieben.

2.2.3 Verarbeitung der Rohdaten

Nach dem Einlesen der Rohdaten von Messungen an den Referenzmaterialien sind verschiedene Korrekturen notwendig. Sie sind im Kapitel 4 beschrieben. Dies betrifft immer die Nullpunktkorrektur und wenn möglich die Korrektur der thermischen Drift. Die Korrekturen können automatisch oder manuell erfolgen. Die Art der Korrektur wird im **Configuration**-Fenster auf der Seite **Analysis normal** festgelegt.

Die korrigierten Daten sollten in den programmspezifischen Dateiformaten **DAA** und **AVR** abgespeichert werden. Dadurch brauchen die Korrekturen später nicht wiederholt werden. Die AVR-Dateien werden auch zur Berechnung der Flächenfunktion und Gerätesteifigkeit benötigt.

2.2.4 Mitteln und Speichern der Messdaten

Alle Files, die zu derselben Probe gehören und die mit gleichen Messparametern (insbesondere gleicher Last und gleichem Zeitablauf) gemessen wurden, können gemittelt und in einem Average-Datenfile (AVR) oder als korrigierte Einzelkurven in einem DAA-File gespeichert werden. Dies erfolgt

normalerweise automatisch, wenn mehrere Messkurven gleichzeitig eingelesen werden. Ansonsten können Daten über die Save **Save** Schaltfläche im Hauptmenü gespeichert werden. Der Datentyp wird dabei automatisch je nach Kontext festgelegt.

2.2.5 Berechnung von Flächenfunktion und Gerätesteifigkeit

In diesem Schritt werden für spitze Indenter (Berkovich, Vickers, Cube Corner) die gerade erzeugten AVR-Files verwendet, um daraus eine AREA-Datei zu erstellen, mit deren Hilfe dann die endgültige Berechnung der Flächenfunktion erfolgt. Im Bereich von Eindrucktiefen unter 4 µm sollte immer eine Indenter-Flächenfunktion verwendet werden. Jeder spitze Indenter besitzt einen endlichen Spitzenradius im Bereich 50nm … 1µm. Die Flächenfunktion ist so genau wie möglich zu bestimmen, um korrekte Ergebnisse für die Härte und den Elastizitätsmodul zu erhalten. Eine der schwierigsten Aufgaben bei der Messung mit Nanoindentern besteht darin, einen genauen Wert für die Gerätesteifigkeit zu erhalten. Siehe dazu Kapitel 6, Bestimmung von Flächenfunktion und Gerätesteifigkeit.

Bei Verwendung von Flat Punch Indentern (flachen Stempeln) ist nicht unbedingt eine Kalibrierung erforderlich. Es ist jedoch empfehlenswert die Gerätesteife zu verwenden, die mit einem anderen Indentertyp ermittelt wurde.

Für Kugelindenter kann bei rein elastischen Messungen die Kalibrierung verkürzt werden, da nur Messungen mit einer Last erforderlich sind. Siehe dazu Kapitel 6.2.

2.2.6 Ergebniszusammenstellung

Das Programm ermöglicht die automatische Auswertung mehrerer Messungen gleichzeitig. Alle Ergebnisse die man während einer Session ermittelt, werden gleichzeitig in einer Ergebnistabelle zusammengefasst, die sich über die Schaltfläche Results Results öffnen lässt. Details zur Ergebnisdarstellung sind in den Kapiteln 3.7 und 5.1 zu finden.

2.2.7 Vordefinierte Applikationen

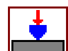
Wenn Daten von den ASMEC Geräten ausgewertet werden, hängt der Typ der Auswertung von der während der Messung gewählten Applikation ab. Dies können Messverfahren mit einem oder zwei Messköpfen (zusätzliche laterale Messungen) sein.

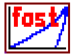
Für alle anderen Gerätetypen steht nur eine bzw. zwei Applikationen zur Verfügung und die Auswertung ist auf Messungen mit einem Messkopf beschränkt. Dies ist die Applikation

 *Variable normal load-displacement measurements*

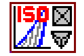
Yield strength by cyclic measurements with spheres. Diese Applikation ist zusätzlich für das UMIS-2000 verfügbar.

Die folgende Übereicht zeigt alle verfügbaren Applikationen. Die Art der Auswertung ist an die Applikation gekoppelt.

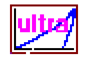
 Belastungsmodus Normal indentation:

 *Fast hardness + modulus measurement (ISO 14577)*

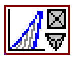
Schnelle Härte- und E-Modulmessung nach ISO 14577 im open loop mode

 *ISO 14577 standard hardness and modulus*

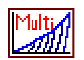
Langsame Härte und E-Modulmessung nach ISO 14577 im closed loop mode

 *Ultra fast hardness + modulus measurement*

Sehr schnelle Härte und E-Modulmessung mit einer reinen Messzeit von rund 2s

 *Variable normal load-displacement measurements*

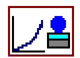
Variable Applikation für beliebige Belastungsmodi, Kraft- oder Weggesteuert

 *Cyclic hardness measurement*

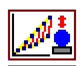
zyklische Härte- und E-Modulmessung

 *Hardness+ modulus with QCSM method*

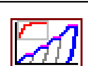
QCSM - Modul erforderlich

 *Elastic modulus measurements with spheres*

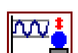
Messungen des Elastizitätsmoduls mit Kugelindentern

 *Yield strength by cyclic measurements with spheres*

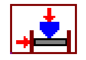
Fließgrenzenbestimmung mittels zyklischer Messungen mit Kugelindentern

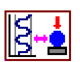
 *Stress-strain measurements with spheres + NN*

Spannungs-Dehnungs Messungen mit Kugelnindentern und **N**euronalen **N**etzen

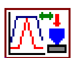
 *Fatigue test with spheres, normal*

Ermüdungstest mit Kugelindentern in Normalrichtung

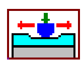
 Belastungsmodus Normal + lateral indentation:

 *Fatigue test with spheres, lateral*

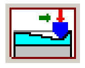
Ermüdungstest mit Kugelindentern in lateraler Richtung

 *Friction test (normal + lateral force)*

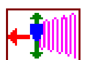
Reibungstest mit Messung der Normal- und Lateralkraft

 *Oscillatory wear test*

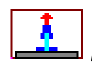
Reversierender (oszillierender) Verschleißtest

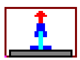
 *Scratch test*

Ritztest zur Bestimmung der Schichthaftung

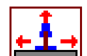
 *Oscillatory scratch test (in Y direction)*

Oszillierender Ritztest mit Tischbewegung in Y-Richtung und lateraler Schwingung

 Belastungsmodus Tensile test:

 *Tensile test (normal force only)*

Zugversuch (nur Messung der Normalkraft)

 *Tensile test with additional lateral force*

Zugversuch mit zusätzlicher Messung der Lateralkraft

3 Das Hauptmenü

Das Hauptmenü von IndentAnalyser besteht aus einer Menüleiste mit Schaltflächen die im Folgende erläutert werden.



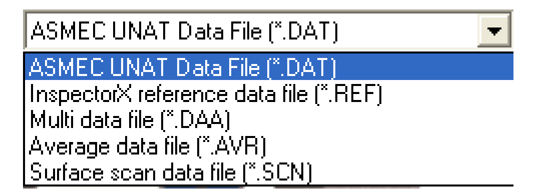
Abb. 3: Menüleiste für die Datenanalyse im Hauptfenster

3.1 Die Menüleiste Datenanalyse



Open

Öffnet eine oder mehrere Dateien mit Messdaten. Die Dateierweiterung hängt vom Gerät ab, das in der Konfiguration ausgewählt wurde. Für die Geräte von ASMEC ist die Standard-Dateierweiterung DAT. Außerdem stehen weitere Dateitypen zur Verfügung die mittels Drop-Down Menü ausgewählt werden.



Folgende Dateitypen können geöffnet werden:

DAT: Standard-Datenformat von ASMEC Geräten. In diesem Format werden die reinen unkorrigierten Messdaten gespeichert.

REF: Enthält die Referenzmessungen der Lateralkraftmessungen zur Bestimmung der aktuellen Federkonstante der Haltefedern (siehe Kapitel 5.8).

DAA: *Multi Data Files* enthalten mehrere Messkurven der gleichem Applikation und der gleichen Kraft nach der durchgeführten Korrektur des Nullpunktes und der thermischer Drift. Wenn diese Messkurven gemittelt werden entsteht daraus ein AVR-File.

AVR: *Average Data Files* enthalten eine gemittelte Messkurve nach Ausführung aller notwendigen Korrekturen.

SCN: *Surface Scan* Datenfiles enthalten Daten von Oberflächenscans

Alle hier genannten Dateien enthalten neben den eigentlichen Messdaten auch Metadaten zu den vorgenommen Einstellungen, der verwendeten Applikation, der Position und den gültigen

Korrekturfunktionen, die mit der Schaltfläche ***Information*** abgerufen werden können.

Wählen Sie Ordner und Dateiname durch Anklicken der Symbole im Dateiauswahl-Dialog. Der Ordner wird als Standardpfad für das Einlesen beibehalten, bis ein anderer Pfad gewählt oder das Programm geschlossen wird.



Save

Speichert die Daten in einem IndentAnalyser Dateiformat, als ASCII- oder Excel-Datei. Das IndentAnalyser Dateiformat hängt davon ab welches Fenster aktiv ist.

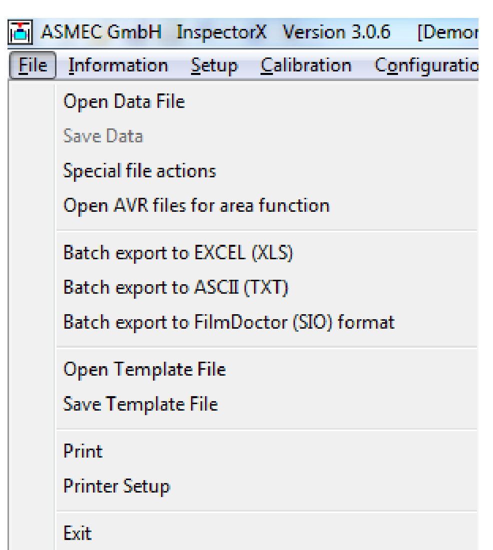
Die Daten werden als **DAT**-Datei gespeichert, wenn das Fenster **Measurement data** aktiv ist.

Sie werden als **DAA**-Datei gespeichert, wenn das Fenster **DATA overview** aktiv ist.

Sie werden als **AVR**-Datei gespeichert, wenn das Fenster **Results window** aktiv ist.

Wählen Sie Ordner und Dateiname durch Anklicken der Symbole und der Eingabezeilen im Dateiauswahl-Dialog. Der Ordner wird als Standardpfad für das Abspeichern beibehalten, bis ein anderer Pfad gewählt oder das Programm geschlossen wird.

Das Speichern von Daten in anderen Formaten ist außerdem über den Menüpunkt **File** in der obersten Menüzeile möglich.



Hier können mehrere Datenfiles auf einmal (**Batch Export**) in Textformat, EXCEL-Format oder in dem speziellen **fdop** Format für die Zusatzsoftware FilmDoctor gespeichert werden.

Die Daten enthalten immer Zeit, Kraft und Weg für den Normal- und Lateralmesskopf (sofern vorhanden). Bei Messungen unter Verwendung der Präzisionstische sind auch die Tischkoordinaten enthalten.

Abb. 4: Export-Funktionen im File-Menü



Print

Druckt den Inhalt des Status-Fensters als Text, wenn es das aktive Fenster ist. Ansonsten wird das aktive Fenster komplett mit Grafik, Schaltflächen, Eingabezeilen und Ergebnisfeldern gedruckt.

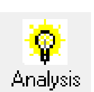
Es erscheint der Drucker-Dialog, der eine Auswahl verschiedener Parameter erlaubt. Die Verwendung der Print-Schaltfläche ist neben der Report-Funktion am besten dafür geeignet, alle Ergebnisse und Parameter zusammen mit der zugehörigen Kurve auszudrucken. Die maximale Breite oder Höhe einer Seite wird in Abhängigkeit vom Seitenverhältnis des Fensters verwendet. Das Größenverhältnis der Elemente (Schriftgröße, Linienbreite u.s.w.) hängt von der Fenstergröße ab.

Wenn ausschließlich das Diagramm gedruckt werden soll, kann die Print-Schaltfläche innerhalb des betreffenden Fensters oder die Print-Schaltfläche des **Graph commander** genutzt werden. Letztere erlaubt eine Seitenvorschau und die Anpassung der verschiedenen Druckparameter.



Information

Öffnet ein Informationsfenster, wenn eine Messung existiert oder ein Datenfile eingelesen wurde. Dieses enthält alle relevanten Informationen wie Probenbezeichnung, Messposition, Applikation, verwendetes Gerät und Indenter sowie Korrekturfunktionen. Das Informationsfenster wird automatisch aktualisiert, wenn eine neue Datei eingelesen wird. Siehe dazu Abschnitt 3.4.



Analysis

Diese Schaltfläche ist nur sichtbar, wenn ein Datenfile eingelesen wurde, dass noch auszuwerten ist, d.h. bei dem die Messdaten noch nicht korrigiert wurden und für das kein Ergebnis im *Average results* Fenster angezeigt wird. Sie hat die gleiche Funktion wie die *Analyse* Schaltflächen im Fenster *Measurement data*. Diese Schaltfläche ermöglicht jedoch einen einfacheren Zugriff und bewirkt, dass keine Korrektur vergessen wird.



Configuration

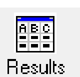
Öffnet das Configuration Fenster. Nach dem Programmstart werden die Daten des zuletzt eingelesenen CFG-Files verwendet. Der Dateiname wird auf der Seite *Main* des Configuration Fensters und in der Statusleiste des Hauptfensters angezeigt. Die Konfigurationsdaten werden in **CFG**-Dateien gespeichert. Siehe dazu Kapitel 3.3.



Open CFG

Öffnet eine Konfigurationsdatei. Die Konfigurationsdaten werden in Konfigurationsdateien mit der Endung **CFG** abgespeichert. Die Datei, die nach dem Programmstart verwendet wird, ist auf der Seite *Main* des Fensters *Configuration* und in der unteren Statusleiste des Hauptfensters angegeben.

Für die unterschiedlichen Messgeräte und Indenterspitzen werden einige Beispieldateien mitgeliefert. Eine Konfigurationsdatei enthält die Parameter, die im Konfigurationsmenü verfügbar sind. Sie beinhaltet Einheiten, Geräteparameter, Gerätetyp, Indentertyp, Flächenfunktion, Werte der Gerätesteifigkeit und vieles mehr.



Results

Öffnet das Fenster **Results summary**. Das Programm gestattet die Analyse einer großen Zahl von Messungen auf einmal. Die Ergebnisse werden in der Tabelle *Results Summary* gesammelt, bis die Tabelle geleert oder das Programm geschlossen wird. Details zur Nutzung der Ergebnistabelle sind in Kapitel 3.7 zu finden



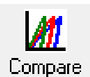
Report

Zeigt ein Fenster mit der Vorschau des Ergebnisreports an. Die Reportseite zeigt den Ausdruck genau so, wie er auf dem Drucker ausgedruckt wird. Mehr Details sind im Kapitel 3.8 zu finden.



Stress-strain

Die Schaltfläche ist nur verfügbar, wenn das Fenster *Average results* geöffnet ist und das Modul "**Stress-strain curve analysis**" erworben wurde. Mit einem Klicken auf die Schaltfläche ***Stress-strain*** wird das entsprechende Auswertefenster geöffnet.



Compare

Öffnet das **Comparison** Fenster. Es erlaubt den Vergleich einer großen Anzahl von Kurven in einem Fenster. Siehe dazu Kapitel 3.5



Graph

Öffnet das Fenster **Graph Commander**. Mit ihm lassen sich die meisten Eigenschaften beliebiger Diagramme ändern und zusätzliche Funktionen nutzen. Der Graph Commander arbeitet immer mit dem aktuellen Graph im aktuellen Fenster. Gegebenenfalls muss mit der Maus in das richtige Fenster geklickt werden, um es zu aktivieren. Im rechten Segment der Statusleiste des Graph Commander wird das aktive Diagrammfenster angezeigt. Siehe dazu Kapitel 3.6.



Open Template

Open Template öffnet ein vorher erzeugtes Grafik-Template. Es hat die Dateierweiterung **TEE**.

Ein Template ist eine Maske für die Präsentation der Diagramme. Hintergrund, Rahmen, Legende, Achsen, Achsenteilungen und -bezeichnungen, Überschriften, Seitenwände (bei dreidimensionalen Darstellung) und andere Elemente einer Grafik haben Eigenschaften, die in einem Template gespeichert werden können. Es enthält nicht die Eigenschaften der Kurven oder Messdaten.

In einem Template kann ein eigener Präsentationsstil festgelegt werden, z.B. für Publikationen.

Eine Template-Datei kann nur eingelesen werden, wenn ein Fenster mit einem Diagramm (Chart-Fenster) geöffnet ist. Das Template beeinflusst nur das aktive Diagramm. Wenn mehrere Fenster geöffnet sind, ist zuerst das Fenster durch Anklicken zu aktivieren, in dem die Grafik geändert werden soll.



Save Template

Speichert die Eigenschaften des aktuellen Diagramms als Template (siehe **0**). Im Datei-Auswahldialog kann das Verzeichnis ausgewählt und ein Dateiname eingeben werden. Die Dateiendung wird automatisch hinzugefügt.

Es ist zu beachten, dass auch die Achsenskalierungen im Template festgelegt werden. In diesem Fall kann das Laden eines neuen Templates zu inkorrekten Achsenskalierungen führen und Daten können verschwinden weil sie außerhalb der Skalierung liegen. Um diesen Effekt zu verhindern, sollte die Achsenskalierung im Chart-Editor auf der Seite *Axis/Scales* auf *Automatic* gesetzt werden. Dies muss für jede relevante Achse getan werden.

3.2  *Öffnen einer Konfigurationsdatei*

Für jedes Gerät, jede Indenterspitze und jede neue Flächenfunktion sollte eine gesonderte CFG-Datei angelegt werden. Die Konfigurationsdateien werden standardmäßig im Pfad **CFG-Files** abgespeichert.

Es können beliebig viele Konfigurationsdateien unter beliebigen Namen abgespeichert werden. Es wird empfohlen einen aussagekräftigen kurzen Namen zu verwenden, z.B. B1_2013-11-01 mit dem Kürzel für die Indenternummer und dem Erstellungsdatum.



Der Software ist mitzuteilen, von welchem Gerät Daten ausgewertet werden sollen und welche Prüfspitze genutzt wurde. Das Menü zur Auswahl des richtigen CFG-Files kann über die Schaltfläche **Open CFG** geöffnet werden.

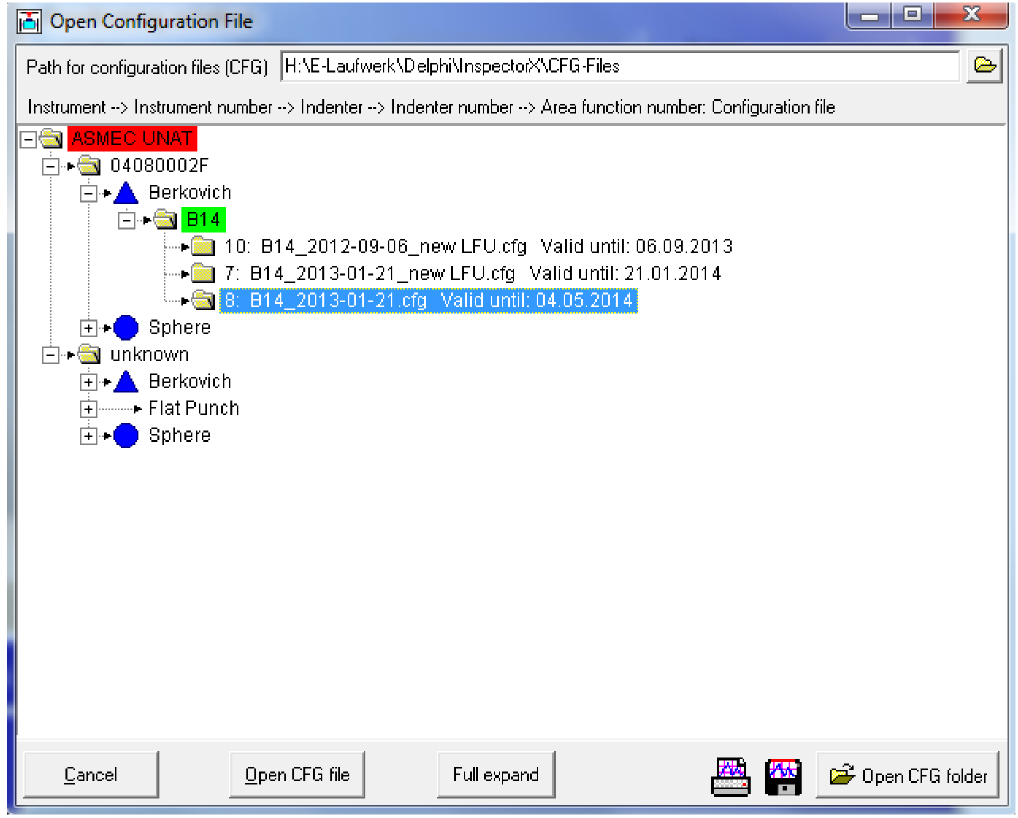


Abb. 5: Fenster zur Auswahl des richtigen CFG Files

Es gibt 4 Hierarchieebenen

Gerätetyp – Die Software kann auch Daten von anderen Geräten als dem UNAT analysieren. Meistens wird jedoch nur ASMEC UNAT zur Auswahl stehen

Gerätenummer – Sofern mehrere gleiche Geräte im Einsatz sind, werden sie über die Gerätenummer unterschieden.

Indentertyp – Er wird durch ein Symbol für die Geometrie verdeutlicht.

Flächenfunktion – Sie wird bei einer neuen Kalibrierung derselben Prüfspitze durch eine zunehmende Nummer charakterisiert.

Eine größere Nummer der Flächenfunktion gehört normalerweise zu einem neueren Kalibriedatum – dies muss jedoch nicht immer so sein.

Falls man das File direkt über den Filenamen im Dateimanager auswählen will kann die Schaltfläche Open CFG folder verwendet werden.

Das ausgewählte File wird durch Doppelklick auf den Namen oder mit der Schaltfläche **Open CFG file** geöffnet.

Sofern erstmals ein neuer Indenter verwendet werden, ist noch kein CFG-File vorhanden und muss angelegt werden. Dazu ist das **Configuration** Fenster mit der Schaltfläche **Configur.** zu öffnen und auf der Seite Indenter der Indentertyp auszuwählen. Bei Verlassen des Auswahlmenüs erscheint die Meldung

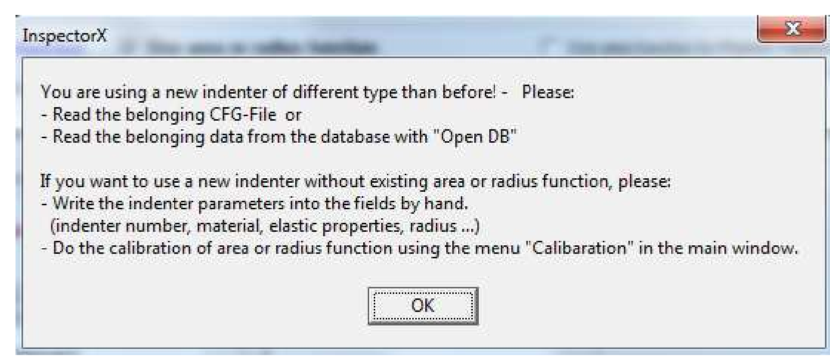


Abb. 6: Hinweis bei der Definition eines neuen Indenters

und weist darauf hin, dass noch Kalibrierdaten zugeordnet werden müssen oder eine Kalibrierung durchgeführt werden muss. Anschließend ist eine eindeutige Nummer im Feld **Indenter no.** Zu vergeben, anhand derer der Indenter immer identifiziert werden kann. Es empfiehlt sich als erstes einen Buchstaben als Abkürzung für die Art des Indenters zu verwenden:

B – Berkovich
V – Vickers
S – Kugel (Sphere) + Nominalradius, z.B. S10
CC – Cube Corner
C – Cone (Kegel)
P – Flat Punch (flacher Stempel)

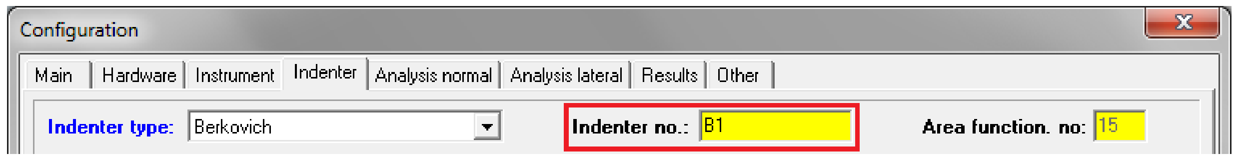


Abb. 7: Configuration Fenster mit Indenternummer (rotes Rechteck)

Der neue Indenter wird dann mit **Save CFG** in einem neuen Configuration File gespeichert. Auch hier empfiehlt es sich den Filenamen mit der Indenternummer zu beginnen und dann das Datum der Erstellung anzuhängen, z.B. **B1_2013-09-05.CFG**

3.3 *Das Konfigurationsfenster*

3.3.1 Seite Main

Die Konfiguration der Software erfolgt im Fenster **Configuration** aufgerufen durch:

- Menüpunkt ***Configuration* → *Configuration window*** oder
- Schaltfläche ***Configuration***

Selected configuration file: Zeigt den Namen der aktuell ausgewählten Konfigurationsdatei an. Eine Konfigurationsdatei enthält alle Korrekturdaten, die zum Auswerten von Datenfiles notwendig sind wie Flächenfunktion, Gerätesteifigkeit, Art und Format der auszugebenden Ergebnisse. Sie hat die Dateiendung **CFG**. Eine **CFG** - Datei kann auf einen anderen Computer kopiert werden, um dort zur Analyse von Messdateien verwendet zu werden.

Konfigurationsdateien mit der Dateiendung **CFU** aus älteren Versionen des Programms IndentAnalyser können ebenfalls eingelesen werden.

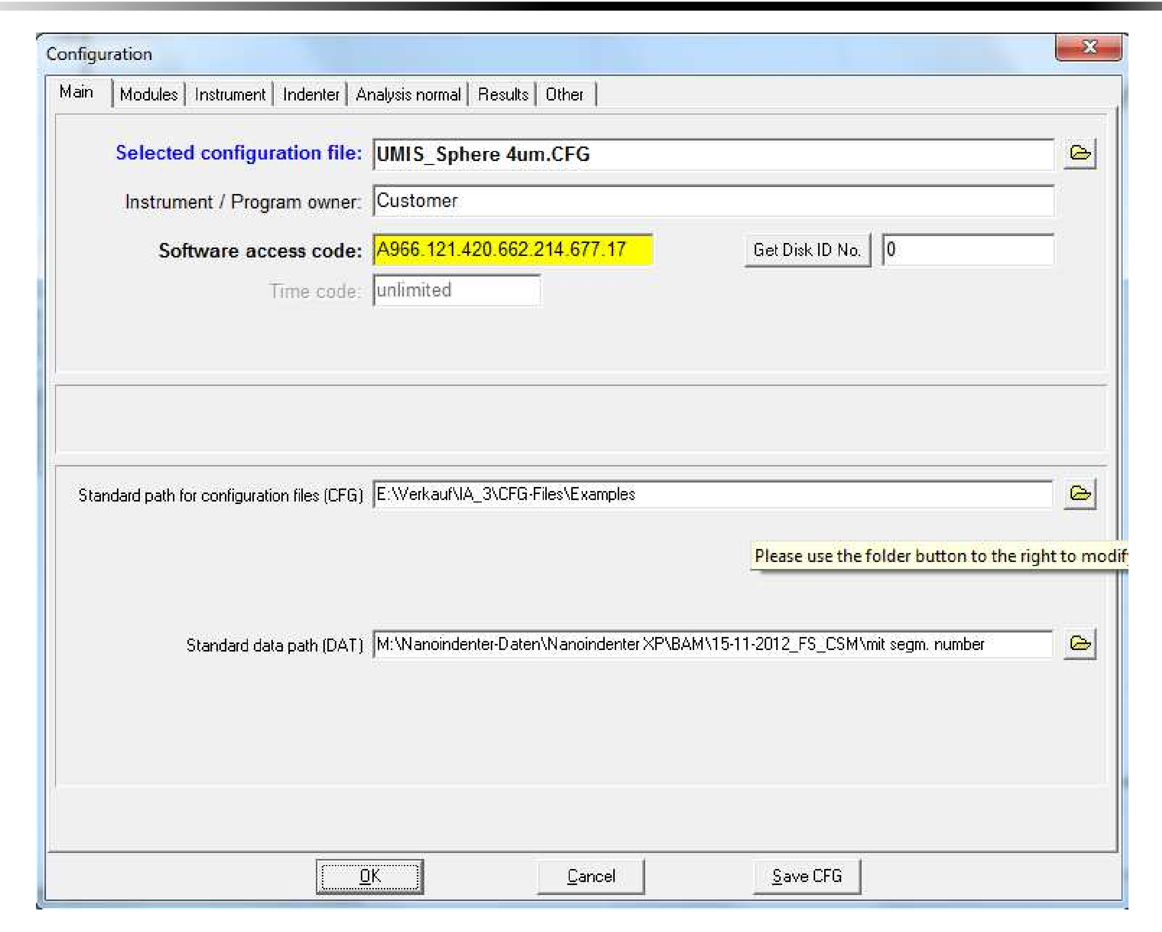


*Abb. 8: Die Seite **Main** des Konfigurationsfensters*

Instrument / Program owner: Hier kann der Eigentümer oder Betreiber des Messgerätes bzw. des Softwareprogramms eingetragen werden. Dieser Eintrag ist rein informativ.

Die Software ist kopiergeschützt. Ohne Zugangscode startet das Programm als **Trial Version**. In ihr wird nur das Einlesen der Rohdaten verhindert – die meisten der anderen Funktionen können ohne Einschränkungen genutzt werden.

Der Software-Zugangscode, den man nach dem Erwerb der Software vom Lieferanten erhält, wird in das Feld **Software access code** eingetragen.

Durch Anklicken der Schaltfläche ***Get Disk ID No.*** erscheint im Feld rechts daneben die aktuelle Identifikationsnummer der Festplatte in einem dezimalen Zahlenformat. Diese wird zur Berechnung des Software access code benötigt.

In den folgenden Feldern werden die Standardordner für folgende Dateitypen definiert:

- Configuration files (**CFG**) - Konfigurationsdateien
- Data (**DAT**) - Datendateien.

Der Dateipfad kann durch Anklicken der Schaltfläche auf der rechten Seite des jeweiligen Feldes ausgewählt werden.

Alle Änderungen im Configuration-Fenster werden nur dann dauerhaft abgespeichert, wenn die Schaltfläche ***Save*** im unteren Teil des Fensters betätigt wird. Sollen die Änderungen nur temporär für die aktuelle Session gelten, ist das Drücken der ***OK*** -Schaltfläche ausreichend. Mit einem Neustart der Software gehen diese Änderungen verloren.

Zum Verwerfen aller Änderungen ist **Cancel** zu drücken.

3.3.2 Seite Modules

Die Seite **Modules** (Abb. 9) des Konfigurationsfensters wird verwendet, um anzuzeigen, welche Softwaremodule erworben wurden. Sind die Prüfkästchen inaktiv, so wurden sie nicht erworben. Die Module können durch Entfernung des Häkchens deaktiviert werden, z.B. bei Störungen.

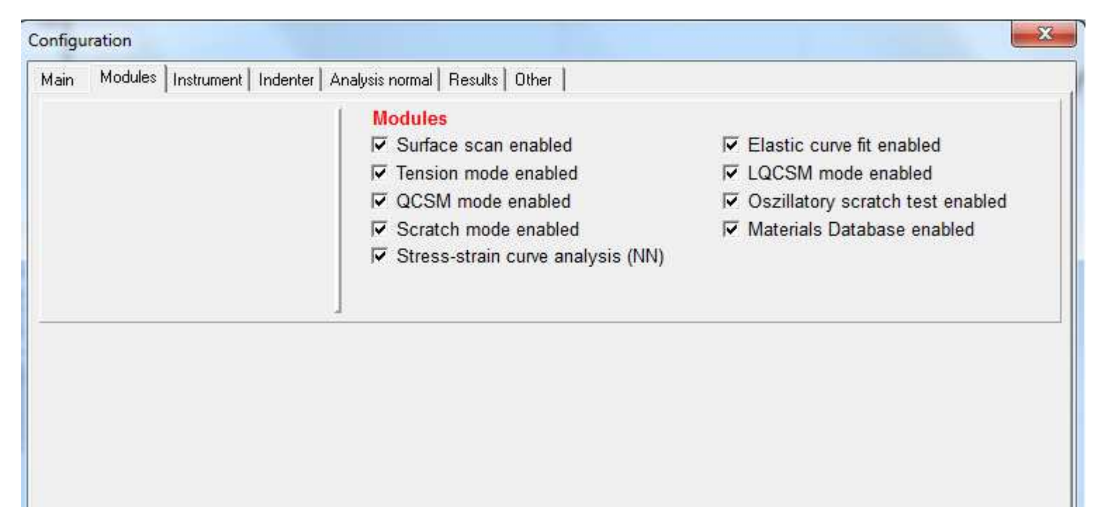


*Abb. 9: Die Seite **Modules** des Konfigurationsfensters*

- Surface scan enabled – ermöglicht die Auswertung von Oberflächen-Scans unter Verwendung der XY-Tische (Profilometer-Funktion).
- Tension mode enabled – ermöglicht die Auswertung von Spannungs-Dehungs-Kurven.
- QCSM mode enabled – ermöglicht die Auswertung von dynamischen Messungen im QCSM oder CSM Modus.
- Scratch mode enabled – ermöglicht die Auswertung von Scratchtests
- Stress-strain curve analysis (NN) – Modul für die Ermittlung von Spannungs-Dehnungs-Kurven von Metallen unter Verwendung von neuronalen Netzen
- Elastic curve fit – Fitmodul zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls dünner Schichten oder Substrate aus rein elastischen Messungen
- LQCSM mode enabled – ermöglicht die Auswertung von dynamischen Messungen in lateraler Richtung.
- Oszillatory scratch test enabled – ermöglicht die Auswertung von Scratchtests mit oszillierender Lateralkrafteinheit. Erfordert das Scratchtestmodul.
- Materials Database enabled – aktiviert die Materialdatenbank. Erfordert den separaten Erwerb der Datenbank.

3.3.3 Seite Instrument

Instrument: Mit IndentAnalyser können nicht nur Daten der ASMEC-Geräte ausgewertet werden, sondern auch die anderer Nanoindenter oder Härteprüfer sofern die Daten im ASCII Format vorliegen. Mit dem Drop-down Menü kann das Gerät ausgewählt werden, dessen Daten ausgewertet werden wollen.

Instrument no.: Definiert eine Gerätenummer die eine eindeutige Zuordnung des eingesetzten Gerätes ermöglicht. Dies ist insbesondere sinnvoll, wenn mehr als 1 Gerät betrieben wird oder wenn Daten zwischen verschiedenen Nutzern ausgetauscht werden sollen.

Falls Messdaten eines anderen Gerätes auswertet werden wollen, ist im Feld **Data file extension** die Dateiendung eingetragen, die das jeweilige Gerät standardmäßig verwendet. Bei der Nutzung eines UNAT ist hier die Endung **DAT** eingetragen und kann nicht geändert werden.

Im Feld **Second extension** kann gegebenenfalls eine zweite Dateiendung eingetragen werden.

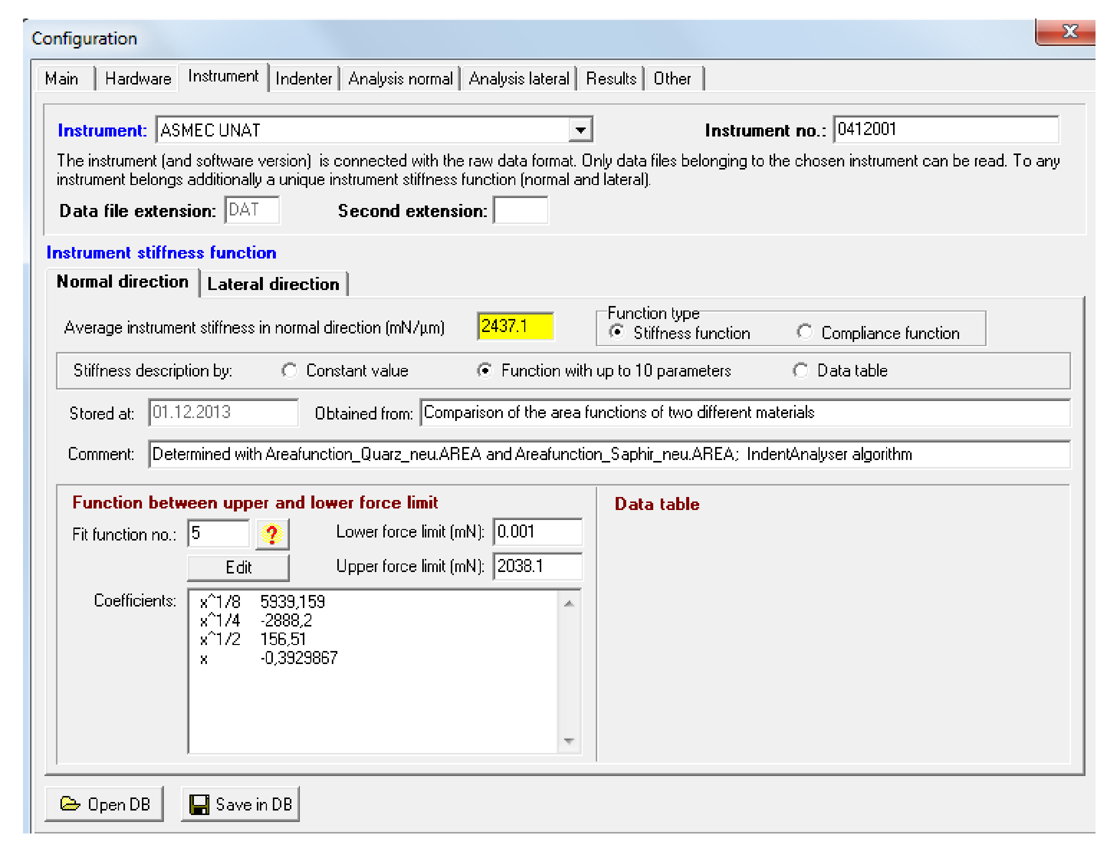


*Abb. 10: Die Seite **Instrument** des Konfigurationsfensters*

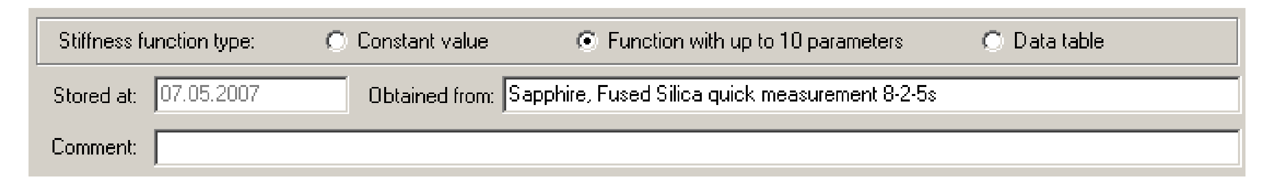
Instrument stiffness function:

Hier stehen die Werte für die Gerätesteifigkeit in normaler und lateraler Richtung. Der Wert für die normale Richtung wird über die Kalibrierung der Gerätesteifigkeit ermittelt und automatisch hier eingetragen (siehe **Kapitel 6**). Die Gerätesteifigkeit des Lateralmesskopfes wird normalerweise durch den Hersteller angegeben.

Function type: Die Gerätesteife kann auch als Nachgiebigkeit (inverse Steifigkeit) dargestellt werden. Dies wird über Function Type festgelegt. Die Art der Beschreibung der Gerätesteife wird normalerweise bei der Kalibrierung festgelegt und automatisch übertragen. Die Verwendung der Nachgiebigkeit statt der Steifigkeit hat den Vorteil, dass auch eine negative Nachgiebigkeit verwendet werden kann, z.B. wenn bereits korrigierte Daten gespeichert wurden und die Steife im Datenfile überkorrigiert wurde.

Stiffness function type: Die Steifigkeitsfunktion kann auf 3 verschiedene Weisen definiert werden:

- **Constant value:** konstanter Wert der Gerätesteifigkeit für den gesamten Kraftbereich des Gerätes. Dies ist die typische Version für andere Geräte als das UNAT.
- **Function with up to 10 parameters:** Die Gerätesteifigkeit wird durch eine Funktion mit bis zu 10 Parametern definiert.
- **Data table:** Die Gerätesteifigkeit wird in Form einer ASCII-Tabelle mit Kraft- und Steifigkeitswerten in 2 Spalten definiert. *Diese Option ist in Version 3 z. Z. nicht verfügbar.*



Average instrument stiffness: Bei einer Steifigkeitsfunktion wird hier der Mittelwert über den kalibrierten Kraftbereich angezeigt. Bei einer konstanten Steifigkeit ist der Wert in dieses Feld einzutragen.

- **Stored at:** Das Datums, an dem die Steifigkeits-Funktion ermittelt wurde, wird automatisch abgespeichert und in diesem Feld angegeben.
- **Obtained from:** Hier kann eintragen werden, mit welchem Referenzmaterial die Steifigkeitsfunktion bestimmt wurde oder von welcher externen Quelle diese Funktion stammt.
- **Comment:** Eintrag eines Kommentars, die Steifigkeits-Funktion betreffend.

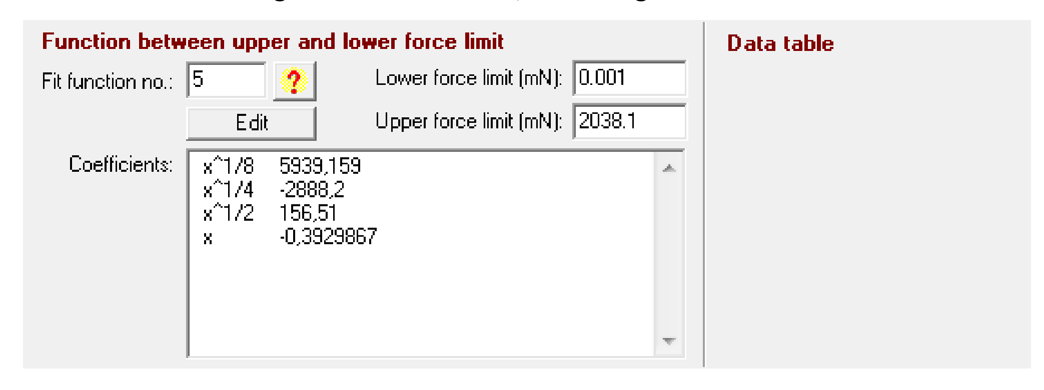


Abb. 11: Fitparameter der Funktion für die Gerätesteife

Function between upper and lower force limit:

Alle hier angezeigten Werte werden im Menü ***Calibration → Area function and instrument stiffness*** ermittelt und automatisch übertragen.

- **Fit function no.:** Nummer der Fitfunktion. Diese Nummer wird während der Kalibrierung ausgewählt und kann hier nicht geändert werden. Die Verknüpfung zwischen der Nummer und der entsprechenden Funktion ist im Hilfemenü angegeben.
- Mit der Schaltfläche neben der Nummer der Fitfunktion wird das **Fit Data** Fenster geöffnet, in dem die Funktion grafisch dargestellt wird (siehe Kapitel 7.4).

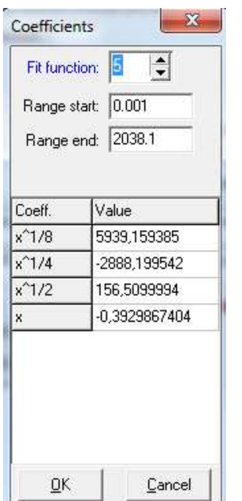


Abb. 12: Eingabefenster für eine Fitfunktion

- **Lower force limit (mN):** Untere Gültigkeitsgrenze für die Gerätesteifigkeitsfunktion. Unterhalb dieses Kraftwertes wird eine konstante Steifigkeit angenommen. Die untere Grenze wird während der Kalibrierung bestimmt, kann hier jedoch geändert werden.
- **Upper force limit (mN):** Obere Gültigkeitsgrenze für die Gerätesteifigkeit. Oberhalb dieses Wertes wird eine konstante Steifigkeit angenommen. Die obere Grenze wird während der Kalibrierung bestimmt, kann hier jedoch geändert werden.
- **Coefficients:** Angabe der Koeffizienten der Funktion, mit der die Steifigkeit beschrieben wird. Um eine eigene Funktion zu definieren, kann mit der Schaltfläche **Edit** ein Fenster geöffnet werden, dass die Eingabe der Fitfunktion und der Parameter erlaubt.

Jede Funktionsnummer ist mit einer Fitfunktion verbunden, die unter 8.4 zu finden ist. Die einzelnen Koeffizienten, die von der Fitfunktion abhängen, können hier eingetragen werden.

X^1/8 bedeutet $x^{1/8}$.

Achtung: *Die Steifigkeitsfunktion hat einen sehr großen Einfluss auf die Messergebnisse. Änderungen an der Steifigkeitsfunktion sollten daher nur mit Sorgfalt vorgenommen werden.*

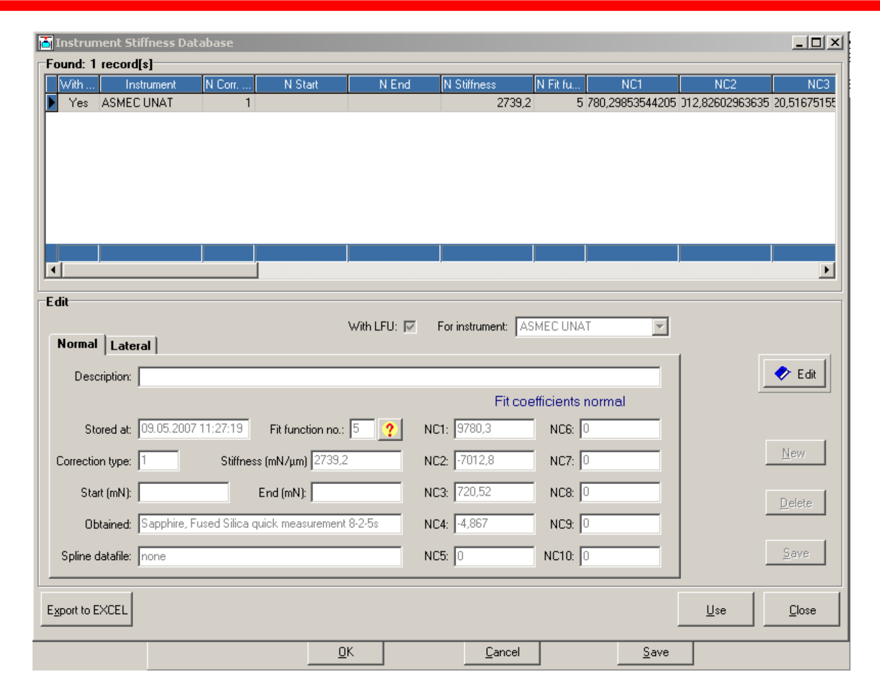


Abb. 13: Fenster Instrument Stiffness Database

Alle in der Registerkarte *Instrument* eingetragenen Angaben lassen sich für späteren Zugriff in einer Datenbank abspeichern (Schaltfläche ***Save in DB***) und später mit ***Open DB*** wieder herstellen. Das Fenster **Instrument Stiffness Database** enthält alle gespeicherten Parameter (siehe Abb. 13).

Das Fenster **Fit Data** stellt ein leistungsfähiges Werkzeug für die Analyse und den Fit von Daten dar. Es wird verwendet, um die Fitfunktion grafisch darzustellen, wenn die ***Schaltfläche*** :gedrückt wird.

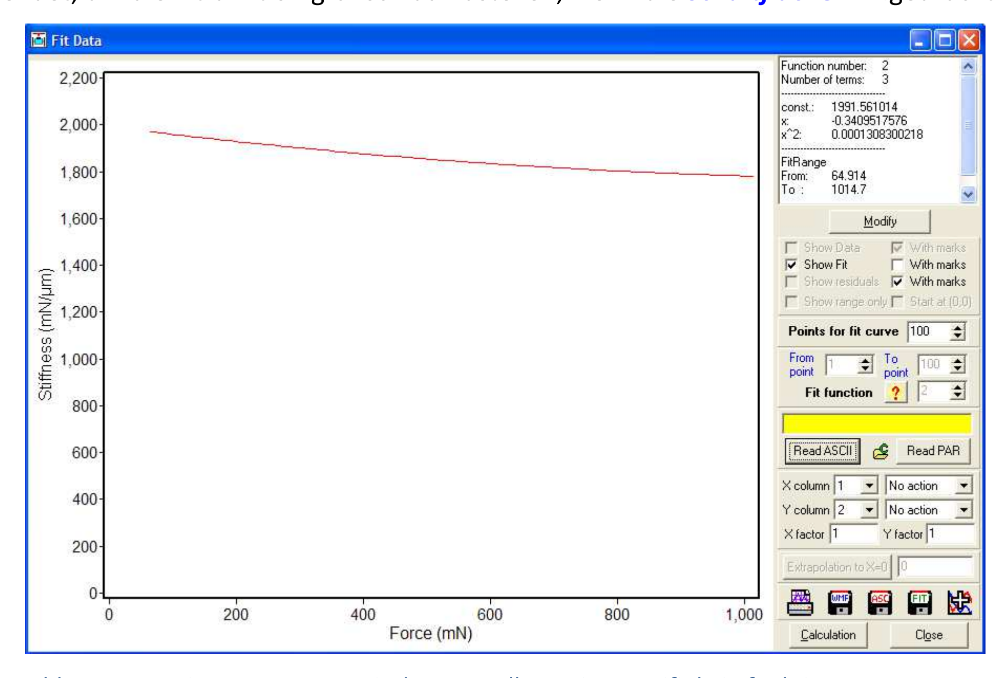


Abb. 14: Das Fit Data Fenster mir der Darstellung einer Steifigkeitsfunktion

3.3.4 Seite Indenter

Die Seite *Indenter* enthält folgende Parameter:

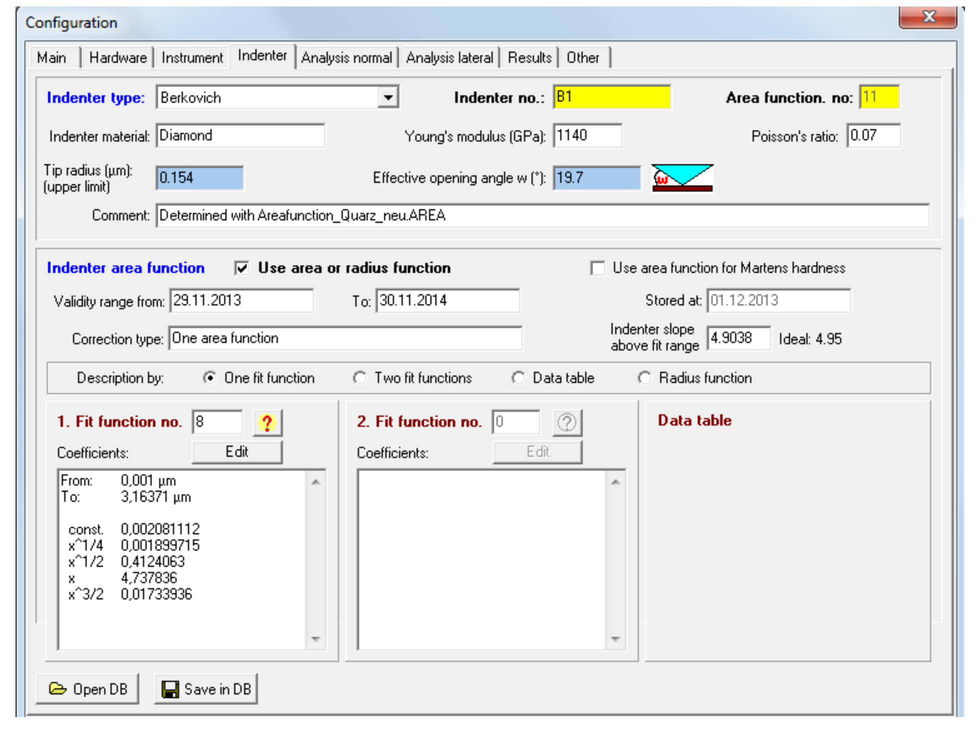


*Abb. 15: Die Seite **Instrument** des Konfigurationsfensters*



Indenter type: Der Typ des verwendeten Indenters kann aus einem Pull-down Menü ausgewählt werden. Die folgenden Typen sind verfügbar:

Vickers:	für Härte- und Modulus Messungen
Berkovich:	für Härte- und Modulus Messungen
Sphere:	für Modulus Messungen, Scratchtests, Verschleißtests und Oberflächenscans.
Cube corner:	für spezielle Härtemessungen und Untersuchungen der Bruchzähigkeit
Cone:	für Sonderuntersuchungen
Flat punch	Flacher Stemple für Sonderuntersuchungen
Rockwell	Kegel mit einem Öffnungswinkel von 120° und einer Kugelkappe von 200µm Radius
Knoop	für Sonderuntersuchungen, nicht für die Modulus Messungen geeignet

Nach Änderung des Indentertyps erscheint die folgende Meldung:

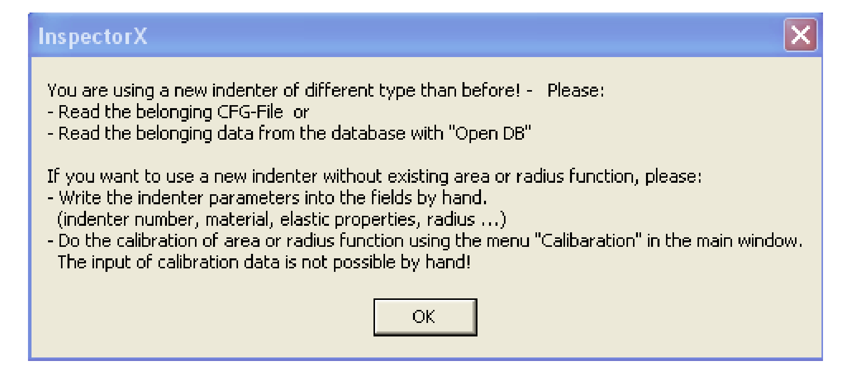


Abb. 16: Warnmeldung bei Wechsel des Indentertyps

Sie weist darauf hin, dass die entsprechenden Daten für den Indenter eingetragen bzw. ermittelt werden müssen.

Indenter no.: Eingabe einer eindeutigen Nummer anhand derer der Indenter später identifiziert werden kann. Es wird empfohlen typische Abkürzungen zu verwenden, z.B. **B** für Berkovich oder **S** für Sphere.

Area function no.: Zu jedem Indenter gehört eine Flächenfunktion welche die Indenterfläche in Abhängigkeit von der Kontakttiefe beschreibt. Normalerweise weicht die Spitze eines Indenters von der Idealform ab und es ist eine entsprechende Korrektur erforderlich. Die tatsächliche Form wird mit der Flächenfunktion beschrieben. Während der Nutzungsdauer des Indenters kommt es zu weiteren Änderungen der Form durch Abnutzung (Verrundung). Daher ist von Zeit zu Zeit eine neue Flächenfunktion erforderlich. Jede solche Funktion erhält eine eindeutige Flächenfunktionsnummer und eine Gültigkeitsdauer.

Indenter material:

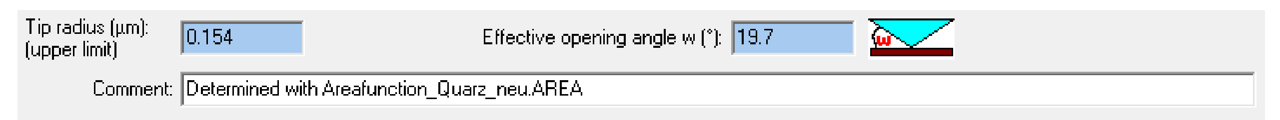
Indenter material: Diamond   Young's modulus (GPa): 1140   Poisson's ratio: 0.07

Es ist notwendig, das Indentermaterial und seine elastischen Konstanten zu definieren, um den korrekten Elastizitätsmodul der Probe berechnen zu können.

Young's modulus (GPa): Elastizitätsmodul; der Standardwert für Diamant ist 1141 GPa

Poisson's ratio: Poissonzahl; der Standardwert für Diamant ist 0.07.

Bei anderen Indentermaterialien als Diamant müssen die Daten modifiziert werden, sonst kommt es zu falschen Ergebnissen.



Tip radius: Bei Kugelindentern ist hier der nomineller Spitzenradius einzutragen. Bei spitzen Indentern wird der abgeschätzte Spitzenradius angegeben. Der Spitzenradius von Berkovich- oder Vickersindentern wird während der Kalibrierprozedur aus den Daten abgeschätzt, die der Eindringtiefe Null am nächsten liegen. ***Dieser Wert ist nur eine Obergrenze*** und kein exakter Wert. Er ist umso genauer, je dichter die ersten gemessenen Werte bei Null Eindringtiefe liegen.

Effective opening angle: Beschreibt den Winkel zwischen Probenoberfläche und Indenteroberfläche, wenn der Indenter als rotationssymmetrischer Körper betrachtet wird. Der Winkel des Vickersindenters von 22° wird in einen effektiven Winkel von 19.7° eines Kegels mit der gleichen Fläche umgewandelt. Dieser Wert ist informativ und wird z.Z. nicht für Berechnungen benötigt außer für konische Indenter, wo er zur Berechnung der Flächenfunktion gebraucht wird.

Comment: In diesem Feld können Bemerkungen zu den Indentereigenschaften bzw. zu deren Ermittlung eingetragen werden. Bei der Kalibrierprozedur wird hier das Datenfile vermerkt mit dem die Werte berechnet wurden.

Indenter area function:

- **Use area or radius function:** Die Flächen- oder Radius-Funktion wird nur verwendet, wenn dieses Kontrollkästchen angekreuzt ist. Andernfalls wird eine Idealform angenommen.

  Use area function for Martens hardness: Wenn das Kontrollkästchen angekreuzt ist, wird für die Berechnung der Martenshärte die gleiche Flächenfunktion verwendet, wie für die Eindringhärte. Oft wird die Martenshärte ohne Flächenkorrektur berechnet, was zu einem scheinbaren Härteanstieg zur Oberfläche hin führt.

- **Validity range**: Dieses Feld definiert die zeitliche Gültigkeit einer Flächen- oder Radiusfunktion von (from) Anfangsdatum bis (to) Enddatum. Der Gültigkeitsbereich wird während der Kalibrierung automatisch bestimmt, beginnt einige Tage vor der Kalibrierung und endet ein Jahr nach der Kalibrierung. Der Gültigkeitsbereich kann geändert werden. Während der Berechnung von Härte oder Elastizitätsmodul gibt es eine Warnmeldung, falls Messungen mit einem Messdatum außerhalb des Gültigkeitsbereiches der Flächenfunktion analysiert werden.

- **Stored at:** Das Speicherdatum der Flächenfunktion wird automatisch gespeichert. Es kann nicht geändert werden.

- Validity range from: 29.11.2013 To: 30.11.2014 Stored at: 01.12.2013

- **Correction type:** Angabe, mit welcher Methode die Flächenfunktion beschrieben wird.

  Correction type: One area function Indenter slope above fit range 4.9038 Ideal: 4.95

  One area function = Beschreibung der Flächenfunktion mit einer Fitfunktion über den gesamten Tiefenbereich. Dieses Feld dient nur zur Erläuterung der darunterliegenden Auswahlmöglichkeit **„Description by"**

- **Indenter slope above fit range:** Im Diagramm $\sqrt{A}=f(h_c)$, d.h. Wurzel aus Flächenfunktion = Funktion der Eindringtiefe, verläuft die Kurve oberhalb des Fitbereiches mit dem hier einzutragenden, konstanten Anstieg. Für Berkovich- oder Vickers-Indenter beträgt der ideale Wert **4,95**. Abweichungen von diesem Wert deuten entweder auf eine Ungenauigkeit bei der Flächenfunktionsermittlung oder auf tatsächliche Abweichungen hin. Wenn man nicht sicher ist, dass die Abweichung real ist, sollt man hier den Idealwert verwenden.

Description by: Diese Zeile gibt an, welche Methode zur Beschreibung der Flächenfunktion verwendet wird. Die hier angezeigten Wahlmöglichkeiten werden beim Kalibrieren im Menü ***Calibration → Area function and instrument stiffness*** festgelegt und automatisch hierher übertragen.



- **One fit function:** Die Flächenfunktion wird durch eine Funktion mit bis zu 10 Koeffizienten für den gesamten Bereich der Eindringtiefe beschrieben.

- **Two fit functions:** Verwendung von zwei Fitfunktionen zur Erhöhung der Genauigkeit, eine Funktion im untersten Bereich der Eindringtiefe, die andere Funktion im darauffolgenden Bereich der Eindringtiefe bis zum Ende des Ermittlungsbereiches der Flächenfunktion

- **Data table:** Die Flächenfunktion wird als ASCII-Tabelle angegeben mit der Kontakttiefe und der Quadratwurzel der Fläche in zwei Spalten. *Diese Option ist in Version 2 nicht verfügbar.*

- **Radius function:** Diese Option wird nur für Kugelindenter verwendet. Anstelle einer Flächenfunktion wird eine Radius-Funktion (effektiver Radius oder effektive Tiefe) für die Beschreibung der Indenterform verwendet.

Fit function no.: Nummer der Fitfunktion. Die Nummer wird während der Kalibrierung ausgewählt und kann hier nicht geändert werden. Die Verknüpfung zwischen der Nummer und der entsprechenden Funktion ist im Hilfemenü angegeben.

- Mit der Schaltfläche ? wird das Fenster **Fit Data** geöffnet, das zur grafischen Darstellung der Fitfunktion verwendet wird (s. Abb. 14).

- **Coefficients:** Dieses Feld zeigt die Koeffizienten der Fitfunktion und ihren Gültigkeitsbereich zwischen einer Untergrenze (from) und einer Obergrenze (to). Außerhalb dieses Bereiches wird eine Idealform des Indenters angenommen. Die Daten können manuell geändert werden, wenn die Schaltfläche ***Edit*** gedrückt wird. Das Fenster **Coefficients** (Abb. 17) wird geöffnet, wo Fitfunktion und Koeffizienten geändert werden können.

Hinweis: Diese Option dient vor allem zur Arbeit mit Flächenfunktion aus einer externen Quelle. Es ist die Funktion (Polynom) einzustellen, die zur Beschreibung der Flächenfunktion verwendet wurde.

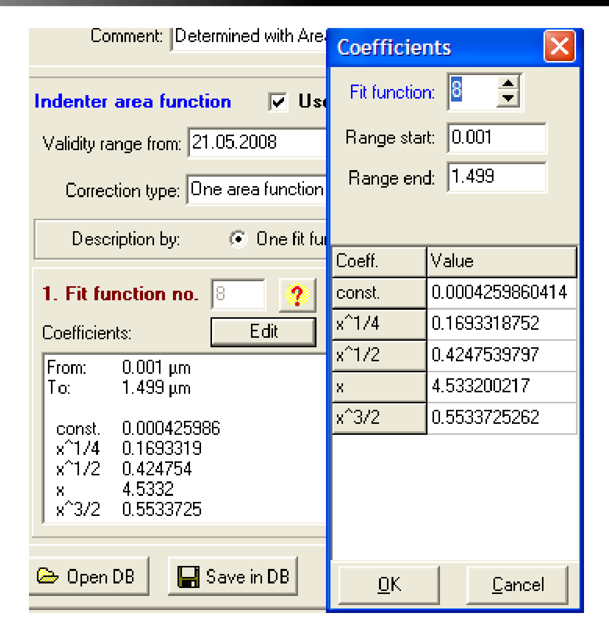


Abb. 17: Fitkoeffizienten der Flächenfunktion und das Fenster zu ihrer Änderung

Alle in der Registerkarte *Indenter* eingetragenen Angaben lassen sich für einen einfacheren Zugang in einer Datenbank abspeichern (Schaltfläche ***Save in DB***) und mit ***Open DB*** wieder herstellen.

Open DB öffnet das Fenster **Area function database**. Es gestattet den Zugang zu allen Flächenfunktionen die zu einem Indenter gehören. Im oberen Bereich werden nur die Datensätze angezeigt, die zum gewählten Indentertyp gehören. Im unteren Bereich werden nur die Datensätze angezeigt, die zu dem Indenter mit der oben ausgewählten Nummer gehören. In diesem Fenster können alle Parameter modifiziert werden.

Achtung: *Üblicherweise wird die Flächenfunktion im Rahmen einer Kalibrierprozedur bestimmt. Falls die Koeffizienten hier geändert werden, kann das zu falschen Messergebnissen führen.*

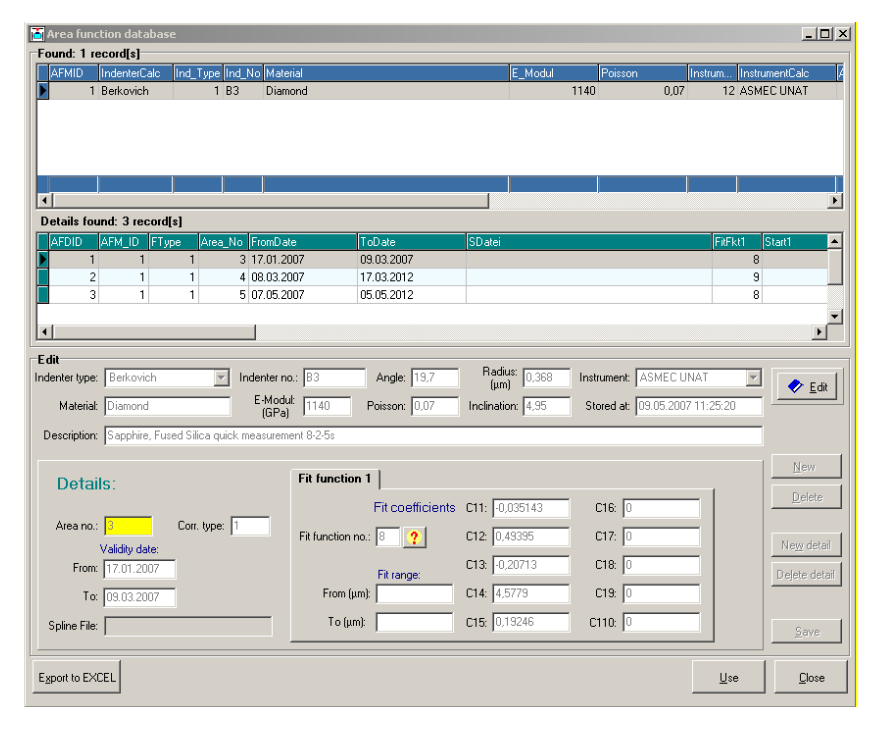


Abb. 18: Das Fenster für die Area Function Database

3.3.5 Seite Analysis normal

Auf der Registerkarte *Analysis normal* werden die Einstellungen vorgenommen, die für die Datenauswertung bei Messungen in Normalenrichtung (senkrecht zur Probe) relevant sind. Dies betrifft vor allem die Korrektur der Messdaten und die Berechnung von Härte und E-Modul.

Fit range:

- **Fit range of unloading curve (% of Fmax):** Die Entlastungskurve wird mit zwei verschiedenen Funktionen zwischen einer oberen (Start) und einer unteren Kraftgrenze (End) angepasst. Diese Grenzen werden in Prozent (%) der Maximalkraft angegeben. Die obere Grenze sollte zwischen 100% und 90% und die untere Grenze zwischen 80% und 20% liegen. Standardwerte sind 98% und 40%.

Fit range of unloading curve (% of Fmax) Start: 98 End: 40

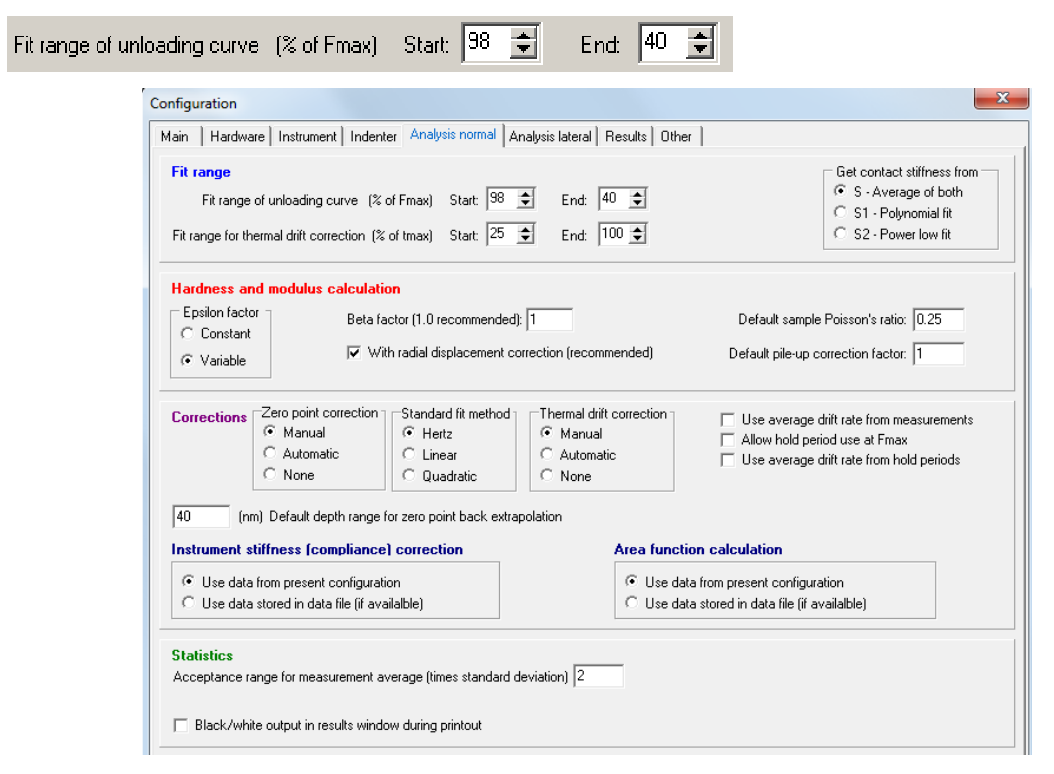


*Abb. 19: Die Seite **Analysis normal** des Konfigurationsfensters*

- **Fit range for thermal drift correction (% of tmax):** Eine Haltezeit bei einer Kraft zwischen etwa 10% und 30% der Maximalkraft kann verwendet werden, um die thermische Drift während einer Messung zu korrigieren. Diese Haltezeit sollte mindestens 30s, besser aber 60s betragen. Die Änderung der Eindringtiefe während dieser Zeit wird durch eine lineare Fitfunktion beschrieben. Es wird empfohlen, die ersten Sekunden des Driftsegments nicht für den Fit zu verwenden. Der Fitbereich sollte zwischen einer Untergrenze (Start) und einer Obergrenze (End) der Haltezeit liegen. Standardwerte sind 25% und 100%.



- **Get contact stiffness from:** Die Entlastungskurve wird mit zwei unterschiedlichen Funktionen angepasst. Die erste Ableitung beider Funktionen bei Maximalkraft ergibt die Kontaktsteifigkeit.

  Die Funktion 1 ist ein Polynom zweiter Ordnung: $F = c_1 + c_2 \cdot h + c_3 \cdot h^2$. Das Ergebnis wird durch den Parameter S1 wiedergegeben.

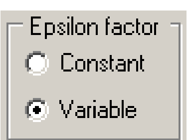
  Die Funktion 2 ist eine Potenzfunktion des Typs $F = C \cdot (h - h_0)^m$. Das Ergebnis wird durch den Parameter S2 wiedergegeben.

Der Parameter S ist der Mittelwert aus beiden Ergebnissen.

Get contact stiffness from
S - Average of both
S1 - Polynomial fit
S2 - Power low fit

Get contact stiffness from: Hier kann ausgewählt werden, welches der drei Steifigkeitsergebnisse zur Berechnung von Härte und Elastizitätsmodul verwendet werden soll.

Hardness and modulus calculation (Berechnung von Härte und E-Modul):



- **Epsilon factor:** Der Epsilon-Faktor ε beschreibt das Verhältnis der elastischen Deformation über der Kontaktfläche zu derjenigen unter der Kontaktfläche. Es existiert ein Zusammenhang zwischen Epsilon und dem Entlastungskoeffizienten **m** der Entlastungskurve (bei Beschreibung durch eine Potenzfunktion). Dies kann genutzt werden, um die Genauigkeit der Berechnung der Flächenfunktion aus der Eindringtiefe zu verbessern.

  In der internationalen Norm ISO 14577 wird ein konstanter Wert von 0,75 empfohlen. Neuere Ergebnisse zeigen jedoch, dass Epsilon zwischen rund 0,7 - 0,8 variieren kann. Deshalb wird empfohlen, einen variablen Epsilon-Faktor zu verwenden.

- **Beta factor:** Der Beta-Faktor β berücksichtigt Unterschiede in der elastischen Deformation zwischen einem rotationssymmetrischen Indenter (Kegel oder Kugel) und einem Indenter mit scharfen Kanten (Pyramide). In der Literatur wurden bei rein elastischen Rechnungen Unterschiede zwischen 1% und 6% gefunden. Zusätzliche plastische Deformation reduziert jedoch diese Unterschiede deutlich. Da nicht klar ist, wie stark die plastische Deformation die Abweichung reduziert, wird ein Wert von 1.0 für den Beta-Faktor empfohlen. Dieser Wert wird auch in ISO 14577 verwendet.

  Beta factor (1.0 recommended): 1

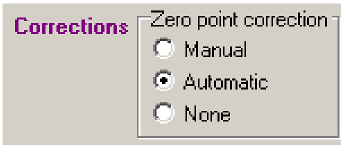
- **Default sample Poisson's ratio**: Dieser Wert wird im *Results Window* angezeigt und kann dort später modifiziert werden. Er wird verwendet, um den E-Modul der Probe aus dem reduzierten E-Modul zu berechnen. Ist kein Wert für das Probenmaterial bekannt, wird ein Wert von 0.3 für Metalle und 0.25 für andere Materialien empfohlen.

  Default sample Poisson's ratio : 0.2

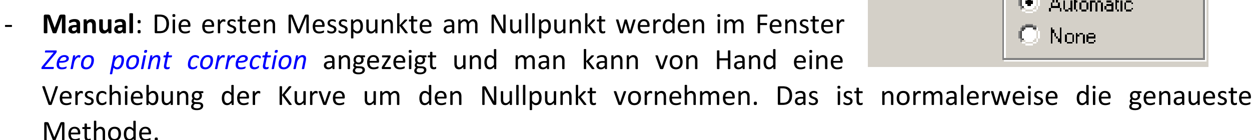
- **With radial displacement correction (recommended):** Setzt man ein Häkchen in dieses Feld, wird die laterale elastische Deformation der Probenoberfläche bei der Berechnung der Flächenfunktion berücksichtigt. Diese Korrektur beachtet neuere Ergebnisse der Kontaktmechanik und verbessert die Genauigkeit. Sie wird in der neuesten Version des internationalen Standards ISO 14577 empfohlen.



Corrections



Zero point correction: Auswahl der Version der Nullpunkt-Korrektur durch Markieren des entsprechenden Feldes.



- **Manual**: Die ersten Messpunkte am Nullpunkt werden im Fenster *Zero point correction* angezeigt und man kann von Hand eine Verschiebung der Kurve um den Nullpunkt vornehmen. Das ist normalerweise die genaueste Methode.



- **Automatic:** Die Nullpunktkorrektur wird automatisch durchgeführt. Das Fenster *Zero point correction* wird nicht angezeigt und man hat keine Möglichkeit zum Eingreifen.
- **None:** Es wird keine Nullpunktkorrektur durchgeführt.

Standard fit method: Es gibt 3 Möglichkeiten, die ersten Messpunkte nahe am Nullpunkt mit einer Fitfunktion zu beschreiben.

Standard fit method
Hertz
Linear
Quadratic

- **Hertz**: Für normale Eindruckversuche wird ein nahezu elastischer Kontakt mit einer kugelförmigen Spitze (Hertzscher Kontakt) für die ersten Nanometer des Eindrucks angenommen. Bei einem solchen Kontakt folgt die Kraft-Verschiebungs-Kurve der Beziehung $F \sim h^{3/2}$. Bei spitzen Indentern sollten nur Datenpunkte bis zu einer Tiefe von etwa 30 nm verwendet werden.
- **Linear**: Lineare Kraft-Eindringtiefe-Abhängigkeit, z.B. bei der Biegung von Balken
- **Quadratic:** Quadratische Kraft-Eindringtiefe-Abhängigkeit, z.B. bei Messungen mit großer Kontaktkraft und pyramidenförmigen Indentern oder Kegeln

Thermal drift correction:

Thermal drift correction
Manual
Automatic
None

- **Manual**: Die Messpunkte einer Haltezeit nach Entlastung werden im Fenster *Thermal drift correction* angezeigt und man kann wählen, welcher Bereich der Messwerte für die Korrektur verwendet werden soll. Das ist normalerweise die genaueste Methode.
- **Automatic**: automatisch durchgeführte Korrektur. Das Fenster *Thermal drift correction* wird nicht angezeigt und man hat keine Möglichkeit zum Eingreifen.
- **None:** Es wird keine Driftkorrektur durchgeführt.

Auswahl von Möglichkeiten für die Korrektur der thermischen Drift:

Use average drift rate from measurements
Allow hold period use at Fmax
Use average drift rate from hold periods

- **Use average drift rate from measurements:** Verwendet eine gemittelte Driftrate aus mehreren Messungen, die nacheinander ausgewertet wurden.
- **Allow hold period use at Fmax:** Erlaubt die Verwendung eines Kriechsegmentes, d.h. einer Haltezeit bei der Maximalkraft F_{max} zur Bestimmung der thermischen Drift. Das Kriechen der Materialien verhindert normalerweise die genaue Berechnung einer Driftrate bei F_{max}. In rein elastischen Messungen gibt es kein Kriechen, und solch ein Kriechsegment kann dann auch zur Korrektur der thermischen Drift verwendet werden.
- **Use average drift rate from hold periods:** Verwendet einen Mittelwert für die Driftrate bei Messungen, die mehrere Haltezeiten beinhalten.

Default depth range for back extrapolation (nm): Definiert die Eindringtiefe für Datenpunkte, die zur Rück-Extrapolation auf die Kraft Null verwendet werden. Der Wert sollte zwischen 20 nm – 70 nm liegen. Normalerweise wird ein elastischer Kontakt (Hertzscher Kontakt) angenommen. Das bedeutet, dass die Kraft-Verschiebungs-Kurve mit einem Exponent von 1.5 für die Abhängigkeit $F=C*(h-h_0)^{1.5}$ beschrieben wird.

40 (nm) Default depth range for zero point back extrapolation

Instrument stiffness (compliance) correction und Area function calculation:

Instrument stiffness (compliance) correction
Use data from present configuration
Use data stored in data file (if availalble)

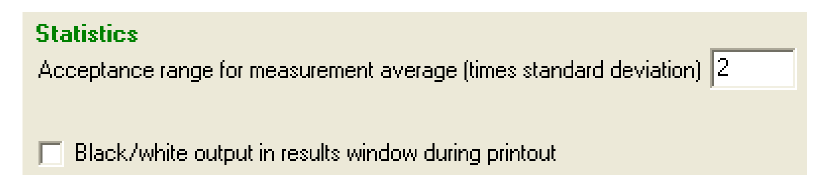
Area function calculation
Use data from present configuration
Use data stored in data file (if availalble)

Standardmäßig werden für die Auswertung von Datenfiles die Korrekturwerte verwendet, die im aktuellen Konfigurationsfile gespeichert sind (*Use correction data from configuration*). Wenn man von anderen Nutzern Datenfiles bekommt, ohne das zugehörige Konfigurationsfile zu haben, lassen sich die Daten jedoch so nicht korrekt auswerten.

Hierzu sollte die Option *Use correction data stored in data file* verwendet werden. Die während der Messung gültigen Korrekturdaten werden auch im Datenfile selbst gespeichert. Mit der Auswahl dieser Option werden sie für die Korrektur verwendet.

Statistics:

Acceptance range for measurement average (times standard deviation): Werden mehrere Kraft-Verschiebungs-Kurven ausgewertet, erhält man im Ergebnis eine mittlere maximale Eindringtiefe sowie die zugehörige Standardabweichung. Das Programm zeigt an, wenn die Differenz zwischen der mittleren Eindringtiefe und der Eindringtiefe einer Einzelkurve größer ist als der Akzeptanzbereich. In diesem Fall wird empfohlen eine Messung zu verwerfen und aus der Mittelung auszuschließen. Es wird empfohlen, nur Werte zwischen **2 - 3** zu verwenden.



Black/white output in results window during printout: Bei manchen Druckern gibt es Probleme, wenn einzelne Ergebnisse im Fenster *Average results* in Farbe dargestellt werden. Mit dieser Option kann veranlasst werden, dass die Ergebnisanzeige während des Druckens kurzzeitig auf Schwarz/Weiß umgestellt wird.

3.3.6 Seite Analysis lateral

Die Seite *Analysis lateral* wird nur angezeigt, wenn ein zweiter Messkopf für Messungen in lateraler Richtung (Lateralkrafteinheit LFU) verwendet wurde.

Spring constant for Lateral Force Unit (mN/µm): In dieses Feld wird automatisch die mittlere Federkonstante der Haltefedern für den Probenhalter der LFU eingetragen, die durch Referenzmessungen bestimmt wird. Eine Änderung ist nicht erforderlich.

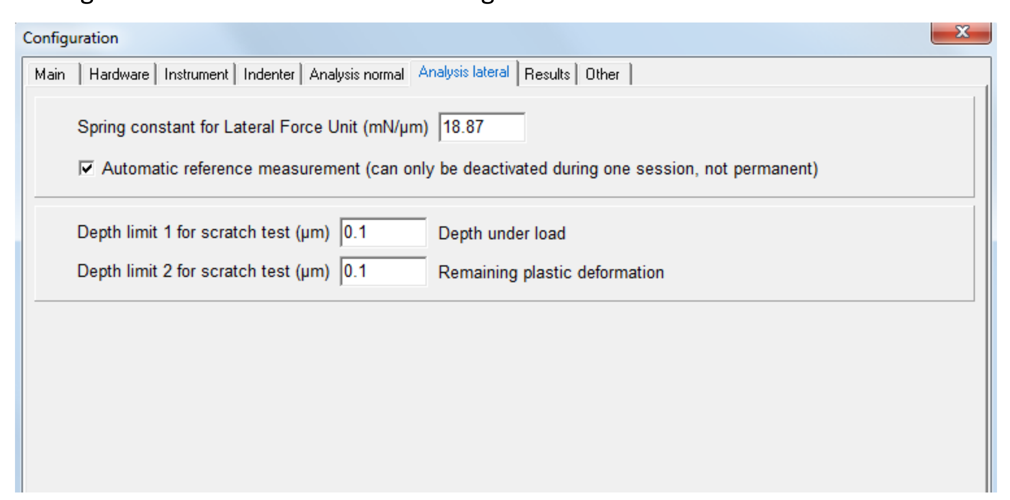


*Abb. 20: Die Seite **Analysis lateral** des Konfigurationsfensters*

Automatic reference measurement: Wenn das Häkchen in diesem Feld gesetzt ist, wird mit der Lateralkrafteinheit eine automatische Referenzmessung gegen Luft durchgeführt um die Federkonstante

der Haltefedern zu bestimmen (Standard). Diese Einstellung kann nur während einer Session ausgeschaltet werden. Die Option ist immer eingeschaltet, wenn die Software gestartet wird.

Depth limit for scratch test: Für die automatische Auswertung von Scratchtests können zwei Grenzen für die Eindringtiefe gesetzt werden. Die Kraft und der Reibwert, bei der diese Grenzen erreicht sind, werden als Ergebnis ausgegeben.

Grenze 1 gilt für die Tiefe unter Last, d.h. einschließlich elastischer Deformation

Grenze 2 gilt für die verbleibende Tiefe nach Entlastung, also ohne elastische Deformation.

3.3.7 Seite Results

Auf der Seite **Results** kann die Darstellung der Ergebnisse im *Results window* und in der Ergebnistabelle *Results summary* festgelegt werden.

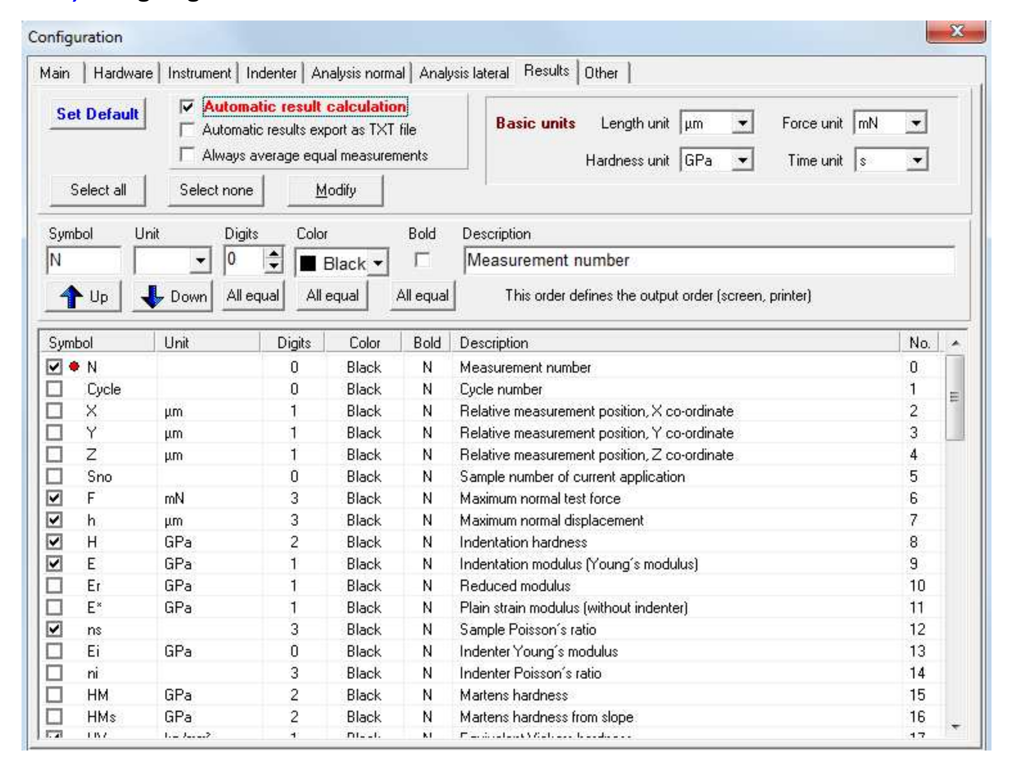


*Abb. 21: Die Seite **Results** des Konfigurationsfensters*

Set default: Durch das Anklicken der Schaltfläche ***Set Default*** wird eine Vorauswahl wesentlicher Messgrößen und deren Eigenschaften definiert und auf Standardwerte gesetzt.

Automatic result calculation: Wenn dieses Kontrollkästchen markiert ist, werden die Ergebnisse berechnet und automatisch angezeigt ohne dass es notwendig ist, irgendeine Schaltfläche nach dem Einlesen eines Datenfiles oder nach dem Abschluss einer Messung zu drücken. In diesem Fall werden die Korrekturen (Nullpunkt- und thermische Drift-Korrektur) ebenfalls automatisch ausgeführt.

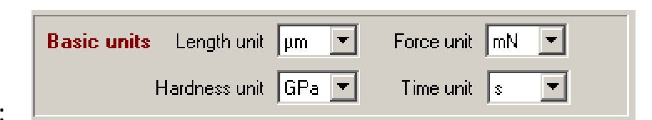
Automatic results export as TXT file: Diese Option veranlasst das Abspeichern einer kleinen Textdatei mit allen Ergebnissen, die auch in der Tabelle *Results summary* zu finden sind, wenn die automatische Auswertung gewählt wurde. Die einzelnen Werte sind mit Tabulator getrennt und können so einfach in EXCEL eingelesen werden.

Always average equal measurements: Dieses Feld ist nur verfügbar, wenn *Automatic result calculation* ausgewählt wurde. Die Mittelwertfiles (AVR) werden automatisch für den Fall erzeugt, dass mehrere Messungen mit gleichen Messparametern und bei gleicher Maximalkraft eingelesen oder gemessen wurden. Die Ergebnisse werden nur für die gemittelten Daten berechnet. Die Mittelung mehrerer Messungen kann die Ergebnisgenauigkeit verbessern.

Select all: Alle in der Tabelle aufgeführten Größen für die Ergebnisdarstellung werden ausgewählt.

Select none: Keine der in der Tabelle aufgeführten Größen für die Ergebnisdarstellung wird ausgewählt.

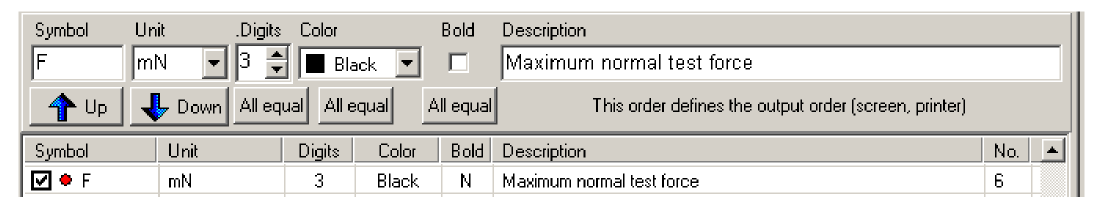
Modify: Alle Änderungen von Symbol, Unit, Digits und Color für die aktuelle Zeile der Tabelle werden erst nach Anklicken von *Modify* übernommen.



Basic units:

- **Length unit:** Wahlmöglichkeit der Längeneinheit zwischen mm, µm und nm
- **Force unit:** Wahlmöglichkeit der Krafteinheit zwischen kN, N, mN, µN, kp, p, kgf, gf und mgf
- **Hardness unit:** Wahlmöglichkeit der Härteeinheit zwischen GPa, MPa, N/mm², kp/mm² und kgf/mm²
- **Time unit:** Wahlmöglichkeit der Zeiteinheit zwischen h, min, s und ms

Auswahl der Ergebnisdarstellung



Eine Zeile in der Tabelle wird aktiviert, indem auf sie geklickt wird. Die aktive Zeile wird durch einen roten Punkt markiert. Die Daten der ausgewählten Zeile werden in den Feldern über der Tabelle angezeigt, und sie können dort geändert werden:

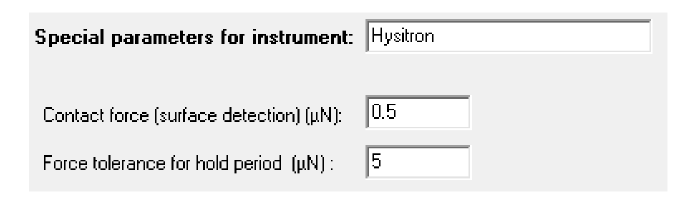
- Symbol: Symbol der Messgröße
- Unit: Maßeinheit der Messgröße
- Digits: Angabe, mit welcher Stellenzahl die Messgröße in der gewählten Maßeinheit angegeben werden soll.
- Color: Auswahl der Farbe für die Angabe der Messgröße
- Bold: Darstellung im Fettdruck
- Description: Frei wählbare Beschreibung für die Messgröße (im Beispiel: Maximum normal test force)

Durch Anklicken der Pfeiltasten (aufwärts) oder (abwärts) wird eine ausgewählte Zeile in der Tabelle nach oben bzw. nach unten verschoben. Auf diese Weise kann die Reihenfolge der Ergebnisse im *Results window* und der Ergebnistabelle definiert werden.

Wünscht man eine einheitliche Darstellung von Digits, Farbe bzw. Fettdruck, klickt man jeweils die Schaltflächen ***All equal*** unterhalb der betreffenden Felder an.

3.3.8 Seite Other

Auf der Seite **Other** werden weitere Konfigurationseinstellungen vorgenommen. Dieser Teil betrifft Einstellungen für den Datenimport. Hier sind die Toleranz für die Kontaktkraft und die Kraft bei Haltezeiten anzugeben.



Diese Werte werden benötigt, um automatisch die einzelnen Segmente einer Messung zu erkennen.

Gibt es Fehler beim Einlesen von Messdaten (außer ASMEC-Geräte), so liegt es oft an einer falschen Einstellung dieser Werte. Die Werte sollten mindestens doppelt so groß sein wie das peak-to-peak Rauschen des Kraftsignals bei der Oberflächenannäherung und bei Haltezeiten.

Data import: In diesen Feldern wird definiert, wenn eine Datenkomprimierung verwendet wird. Für die Auswertung im Fenster *Results window* können die Daten komprimiert werden, um die Zahl der Datenpunkte zu reduzieren. Eine zu hohe Punktanzahl verlangsamt die Datenverarbeitung.

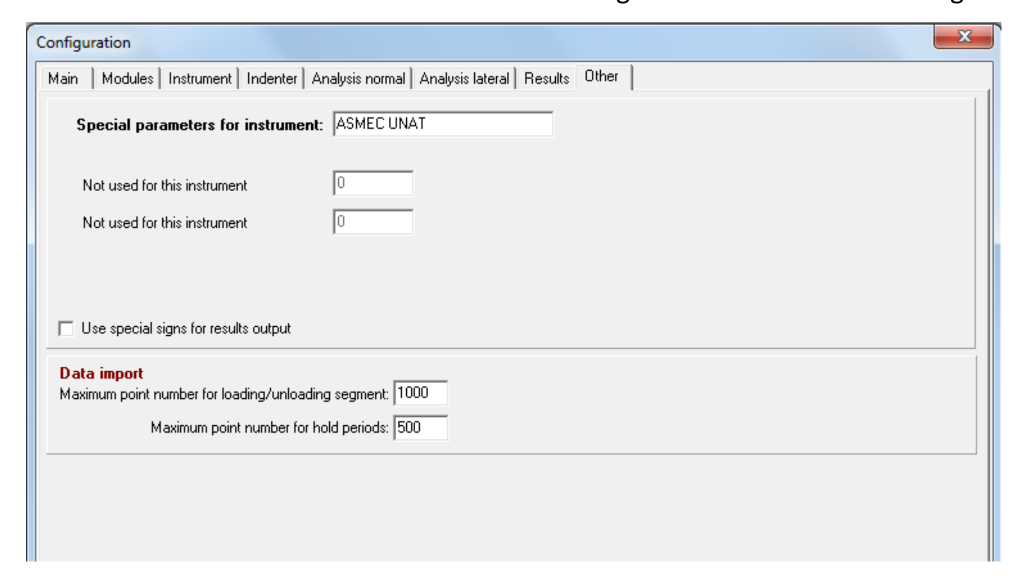


*Abb. 22: Die Seite **Other** des Konfigurationsfensters*

Use special signs for results output: Bei nicht-lateinischen Zeichensätzen kann es insbesondere im Average results Fenster Formatierungsprobleme bei den Zeichen µ, ^{2} und ähnlichen Sonderzeichen geben. Um das zu verhindern ist hier das Häkchen zu entfernen.

3.4 Information Das Informationsfenster

Jedes Datenfile von ASMEC Geräten enthält neben den eigentlichen Messdaten eine Vielzahl von Metadaten, die im Informationsfenster dargestellt werden können. Das Informationsfenster kann geöffnet werden, wenn

- Eine Messung durchgeführt wurde
- Ein Dateifile eingelesen wurde

Wurden mehrere Datenfiles gleichzeitig geöffnet, enthält das Fenster die Daten der zuletzt geöffneten Datei. Das Fenster wird automatisch aktualisiert, sobald eine neue Datei einlesen wurde.

Die Seiten **Instrument** und **Indenter** entsprechen den Seiten im *Configuration* Fenster mit der Ausnahme, dass die Daten nur angezeigt und nicht geändert werden können (s. Abschnitt 3.3.3, 3.3.4).

Seite Main: Diese Seite gibt an mit welchem Gerät und welcher Hardware-Konfiguration, mit welchem Indenter sowie mit welcher Software-Version gemessen wurde. Außerdem enthält es alle Probeninformationen.

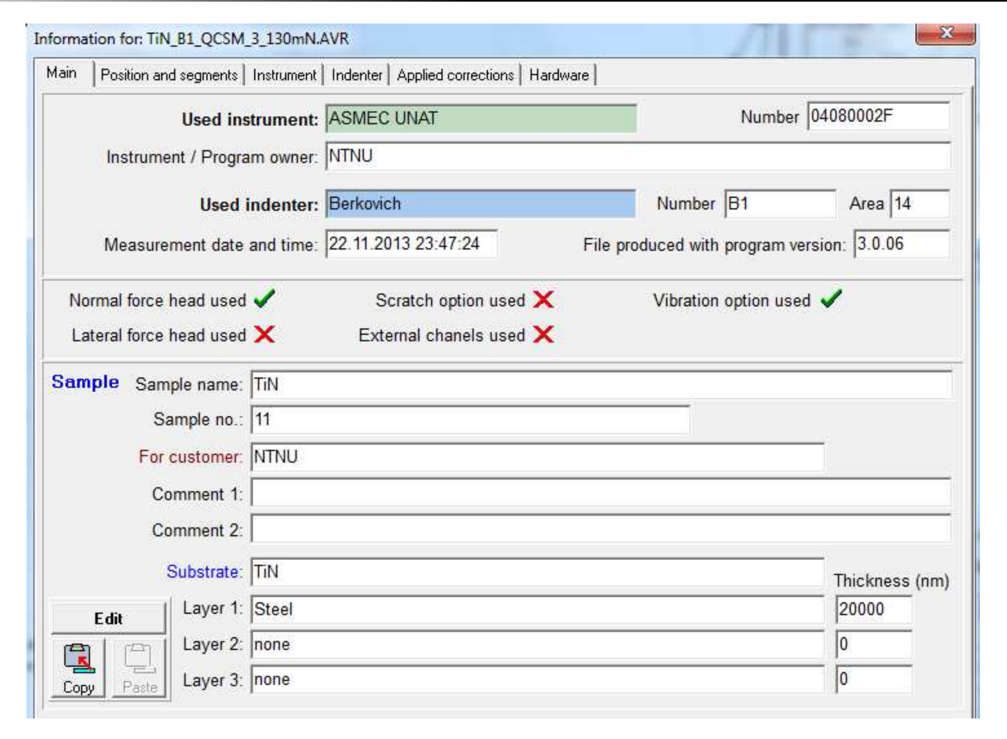


*Abb. 23: Die Seite **Main** des Informationsfensters*

Mit **Edit** kann in den Editiermoduls umgeschaltet werden. Damit lassen sich die Probeninformationen und der Gerätebesitzer ändern. Die Ausschrift auf der Schaltfläche ändert sich in **Save**. Nochmaliges Drücken beendet den Editiermodus und speichert das Datenfile mit den neuen Informationen.

Mit **Copy** können alle Zeilen der Probeninformation gleichzeitig in den Zwischenspeicher übernommen und mit **Paste** in das Informationsfenster einer anderen Messung übertragen werden. Dies erspart viel Schreibarbeit, wenn man vergessen hat die richtigen Probendaten einzutragen und dies nun für mehrere Messungen nachholen muss.

Seite Position and Segments: Auf dieser Seite werden die Applikation, der gesamte Messablauf und die Koordinaten der Messung angegeben. Auf der Unterseite Graph ist der Messablauf grafisch dargestellt, wie im Fenster *Application parameters definition* (s. Abschnitt **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**)

Sehr praktische Funktion sind die Wiederherstellung der Applikationsparameter sowie das Wiederfinden der Messposition auf der Probe.

Goto position below indenter: Fährt den Probentisch an die Stelle unter dem Indenter, an der diese Messung durchgeführt wurde. Vorher wird der Z-Tisch aus Sicherheitsgründen 3mm angehoben. Solange die Probe nicht vom Probenhalter entfernt wurde, kann damit die Messposition immer wiedergefunden werden.

Goto position below camera: Fährt den Probentisch an die Stelle unter der Kamera, an der diese Messung durchgeführt wurde. Vorher wird der Z-Tisch aus Sicherheitsgründen 3mm angehoben und anschließend wieder etwas abgesenkt. eine grobe Orientierungshilfe.

Restore application parameter: Stellt die Applikation, Maximalkraft und den genauen Messablauf, der für diese Messung verwendet wurde, wieder her. Die Werte werden in das Applikationsfenster übertragen. Damit lassen sich ohne Aufwand neue Messungen mit dem gleichen Ablauf programmieren. Es wird sichergestellt werden, dass die Applikationsparameter immer gleich sind, auch wenn diese nicht als **PAR** - File gespeichert wurden.



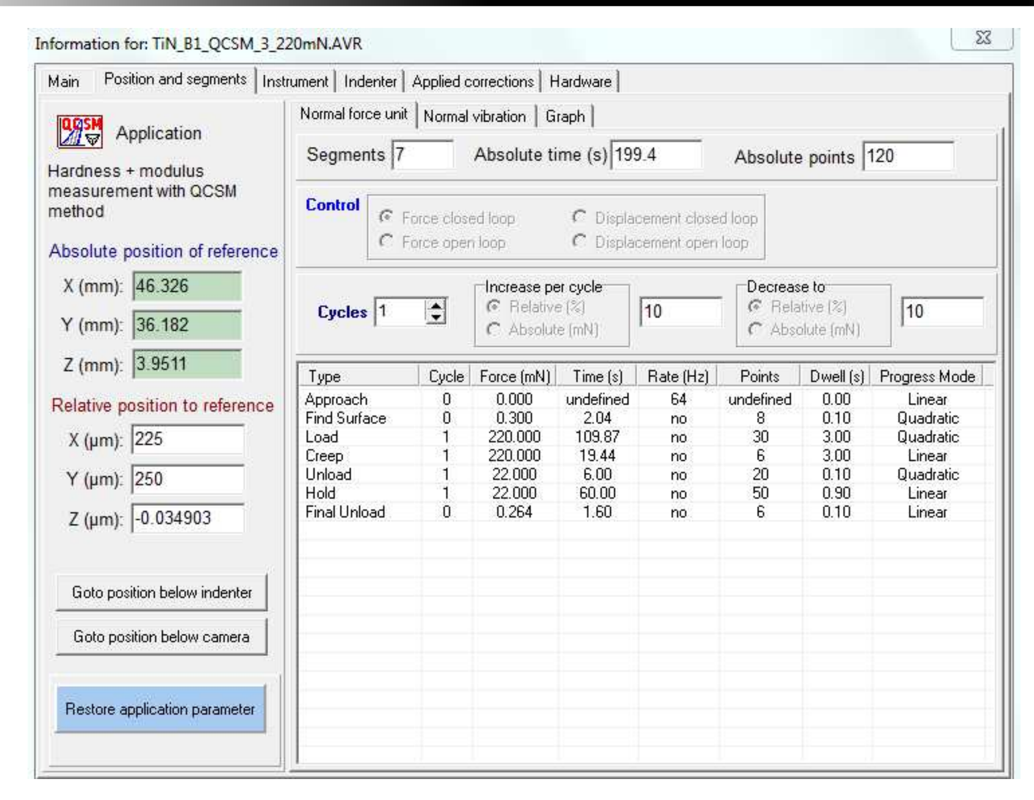


*Abb. 24: Die Seite **Position and Segments** des Informationsfensters*

Seite Applied Corrections: Diese Seite zeigt die Korrekturen an, die auf die Messdaten angewendet wurden. Hier kann später jederzeit nachvollzogen werden, mit welchen Parametern und welchen Ergebnissen die Oberflächensuche, die Nullpunktkorrektur und die Korrektur der thermischen Drift erfolgten.

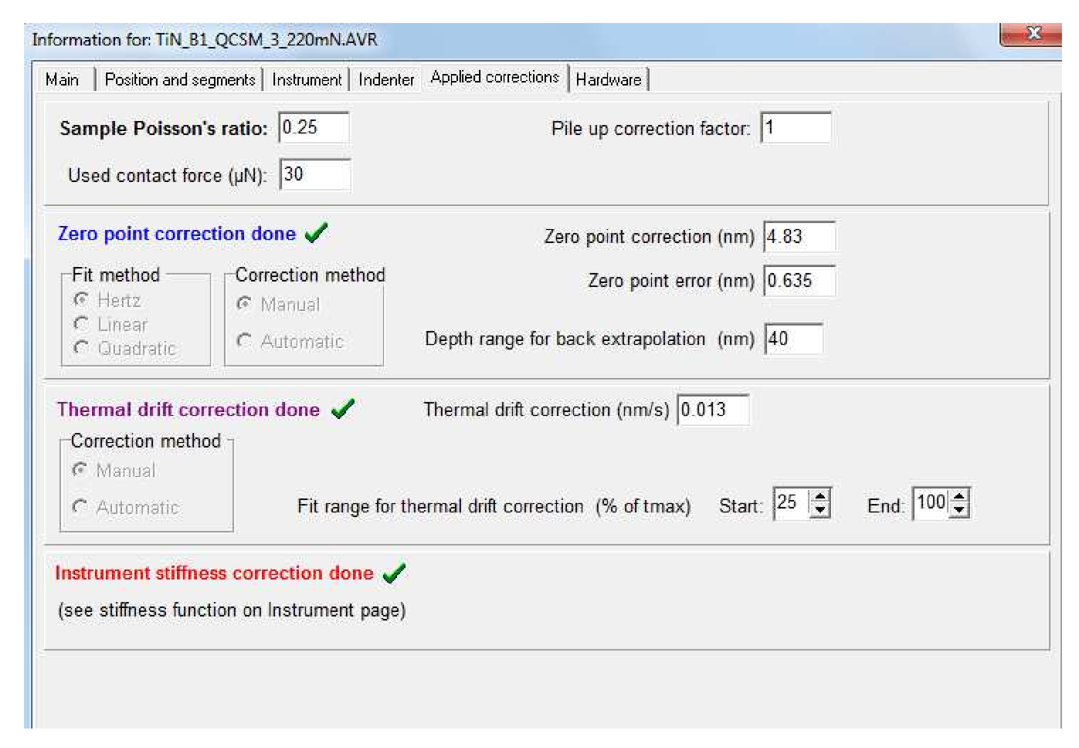


*Abb. 25: Die Seite **Applied corrections** des Informationsfensters*

3.5 Das Vergleichsfenster

Das Fenster **Comparison** dient zum Vergleich von Kurven. Beim Klick auf die Schaltfläche Compare öffnet sich zunächst ein leeres Fenster und die Daten können über ***Add Graph*** eingelesen werden.

Es kann zwischen folgenden Dateitypen ausgewählt werden:

- Datenfiles von IndentAnalyser *.**DAT**
- Average-Dateien von IndentAnalyser *.**AVR**
- Textdateien mit Kopfzeilen *.**TXT** (ASCII data with header) – Wenn diese Dateien ebenfalls mit IndentAnalyser gespeichert wurden, enthält der Header Angaben zu der Zuordnung der Achsen, den Achsbezeichnungen und den Titeln der Kurven
- Textdateien ohne Kopfzeilen *.**ASC (**ASCII data without header)
- Liniendiagramm-Dateien: *.**GRA** (aus älterer ASMEC - Software)
- Beliebige Textdateien mit mehreren Spalten ohne Kopfzeilen

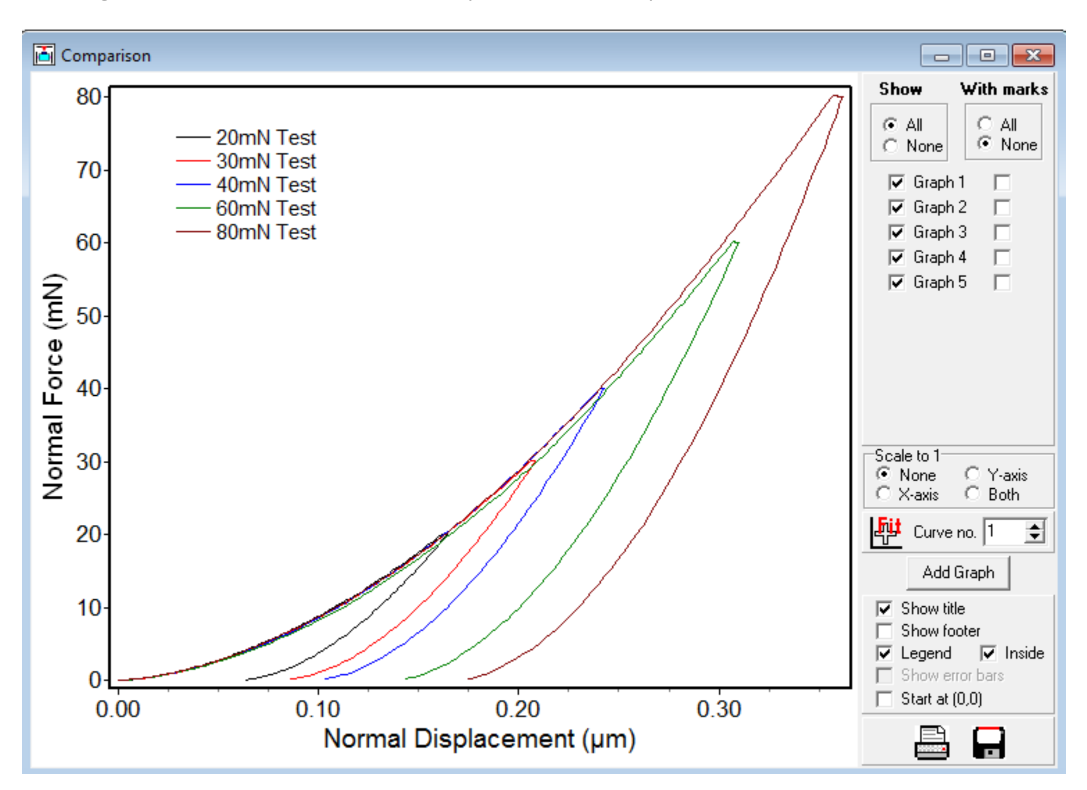


Abb. 26: Fenster Comparison mit dem Vergleich von 5 Messkurven unterschiedlicher Maximalkraft an derselben Probe

Das Programm erkennt automatisch die Anzahl der Datenspalten in einer Datei vom Typ TXT oder ASC und schlägt die Anzahl der Kurven für das Einlesen vor. Die erste Datei definiert Titel und Achsenbezeichnungen im Diagramm.

Eingelesene Kurven können wieder gelöscht werden, indem man mit der rechten Maustaste auf das Feld mit der Graph-Nummer klickt und mit der linken Maustaste bestätigt.

Im Teilfenster **Show** können alle dargestellten Kurven durch Setzen der Markierung bei None ausgeblendet bzw. alle durch Markierung bei All wieder eingeblendet werden.

Abb. 27: Löschen von Kurven im Comparison Fenster

Im Teilfenster **With marks** können alle Kurven mit Markierungen an den Messpunkten (All) oder ohne Markierung (None) dargestellt werden.

Scale to: Ermöglicht die Skalierung der X-Achse, der Y-Achse oder beider Achsen auf den Wert 1 als Maximum. Kurven, die mit verschiedenen Lasten gemessen wurden, sind dann gleich groß und ihre Form kann besser verglichen werden.

Die Titel der Achsen können durch Klicken mit der rechten Maustaste auf die Achse geändert werden. Die Änderungen werden mit *Enter* bestätigt.

Legend: Schaltet die Legende ein und aus. Sie kann in der Grafik durch Klick mit der linken Maustaste und ziehen mit der Maus bewegt werden.

Inside: Standardmäßig befindet sich die Legende rechts neben der Grafik. Mit Inside wird sie innerhalb des Grafikrahmens positioniert. Damit lässt sich Platz sparen.

Start at (0,0): Die Achsen werden automatisch auf einen Bereich skaliert, der die maximale Darstellung der Kurven ermöglicht. Für einen besseren Vergleich mehrerer Grafiken ist es jedoch oft sinnvoll, alle Achsen bei Null zu beginnen.

Show error bars: Das Feld ist nur aktiv, wenn Fehlerangaben für wenigstens eine der Kurven verfügbar sind. Ist dies der Fall, können die entsprechenden Fehlerbalken hier ein und ausgeschaltet werden.

Store all series: Durch Drücken dieser Schaltfläche können alle sichtbaren Kurven gleichzeitig in den Formaten TXT, ASC, XLS oder WMF gespeichert werden. Nutzt man das TXT-Format können diese Kurven anschließend wieder eingelesen werden und alle Achsbezeichnungen und die Zuordnung zu den Achsen werden wieder hergestellt. Dies ist besonders nützlich beim Vergleich von Härte- oder E-Modul-Profilen.

Fit: Durch Drücken auf die Fit Schaltfläche wird die Kurve mit der ausgewählten Nummer (im Feld rechts daneben) in das **Fit Data** Fenster übertragen (s. Kapitel 7.4). Dort können verschiedene Fitfunktionen angewendet werden, um die Kurven detaillierter zu analysieren.

In allen Grafiken können mit der Schaltfläche **Add graph** alle sichtbaren Kurven gleichzeitig in das Vergleichsfenster kopiert werden. Dabei wird berücksichtigt, ob eine Kurve zur linken oder rechten Achse gehört (z.B. bei Scratchtest Auswertungen).

3.6 Der Graph Commander

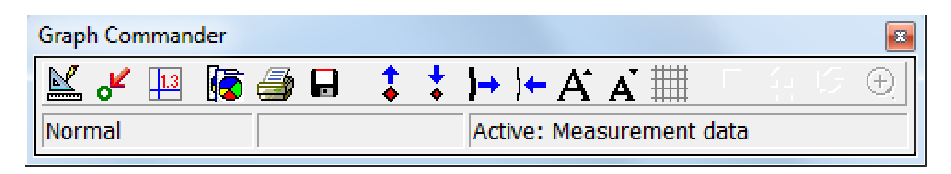


Abb. 28: Das Fenster des Graph Commander zum Bearbeiten von Grafiken

Die Schaltflächen des Graph Commander haben folgende Funktionen:

Chart-Editor: Öffnet den sehr mächtigen Chart-Editor. Mit ihm können alle Grafik-Parameter geändert werden. Er besitzt eine eigene Hilfefunktion, die jedoch nicht auf allen Plattformen funktioniert. Dazu ist das Fragezeichen anzuklicken und anschließend auf das Element zu Klicken, zu dem man Informationen benötigt.

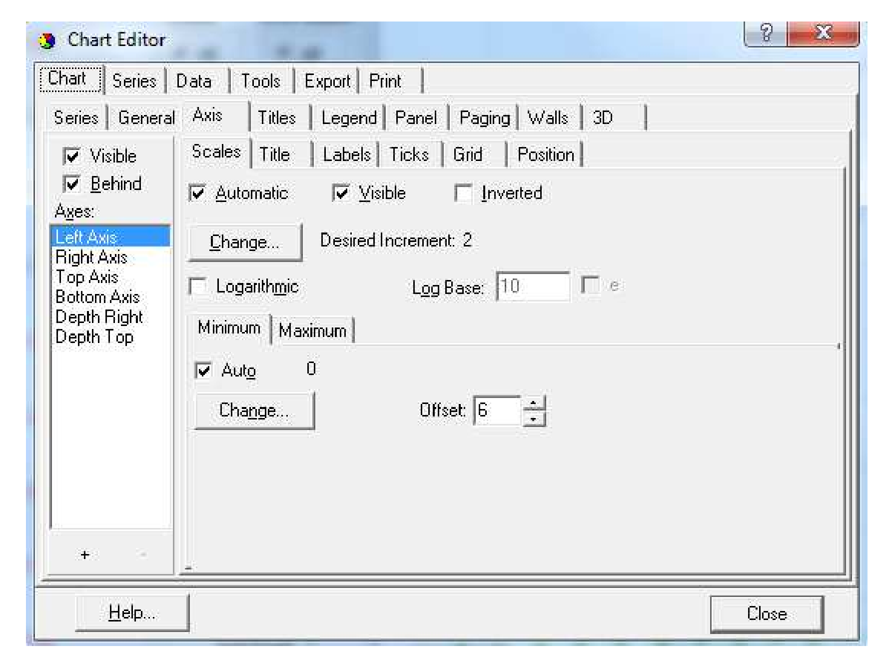


Abb. 29: Fenster des Chart Editors

Standard presentation: Mit dieser Schaltfläche werden sämtliche Änderungen am Diagramm rückgängig gemacht. Es wird der Zustand wiederhergestellt, der beim ersten Öffnen des Fensters vorhanden war.

Measure screen position: Damit wird der Cursor zu einem Fadenkreuz sobald es im Bereich des Diagramms positioniert wird. Das Fadenkreuz ist bis zu den jeweiligen Koordinatenachsen verlängert. Die genaue Position wird im linken und mittleren Segment der Statusleiste des Graph Commander (Abb. 28) angezeigt. Im linken Segment steht der X-Wert und im mittleren der Y-Wert. Die Werte müssen jeweils manuell notiert oder zur weiteren Verwendung übertragen werden. Durch nochmaliges Drücken der Schaltfläche wird die Funktion wieder ausgeschaltet.

Copy to clipboard: Kopiert das aktuelle Diagramm in die Zwischenablage. Im Anschluss kann es in andere Programme wie zum Beispiel WORD oder EXCEL eingefügt werden.

Print graph: Startet die Druckvorschau für das Diagramm. Der Drucker, die Anordnung auf der Seite, die Randeinstellungen sowie andere Parameter können hier ausgewählt und das Diagramm gedruckt werden.

Save graph as picture: Öffnet den Dateimanager für das Abspeichern des Diagramms in den Formaten
- WMF (Windows Meta File)
- BMP (Bitmap)
- JPG (JPG-Format)
- PDF (Portabable document format)

Marks larger: Vergrößert die Punktmarkierungen der Kurven (sofern vorhanden) um jeweils ein Pixel in X- und Y-Richtung. Maximale Größe ist 12.

Marks smaller: Verkleinert die Punktmarkierungen der Kurven (sofern vorhanden) um jeweils ein Pixel in X- und Y-Richtung. Minimale Größe ist 1.

Lines thicker: Vergrößert die Linienbreite der Kurven um ein Pixel. Maximale Größe ist 15.

Lines thinner: Verkleinert die Linienbreite der Kurven um ein Pixel. Minimale Größe ist 1.

Letters larger: Erhöht die Schriftgröße für alle Überschriften und Beschriftungen um eine Stufe.

Letters smaller: Verringert die Schriftgröße für alle Überschriften und Beschriftungen um eine Stufe.

Background grid on/off: Schaltet das Hilfsgitter im Hintergrund des Diagramms ein und aus.

Die weiteren Schaltflächen stehen nur zur Verfügung, wenn eine Grafik in 3D-Darstllung angezeigt wird.

Normal: Setzt die 3D-Befehlseinstellung wieder zurück (deaktiviert die folgenden 3 Schaltflächen), so dass man durch Ziehen der Maus zoomen kann.

Move – Erlaubt es, das Diagramm nach Drücken der linken Maustaste und Ziehen der Maus relativ zum Fenster zu bewegen. Die Funktion wird in der Statusleiste des Graph Commanders angegeben. Die Legende wird nicht mitbewegt.

Rotate: Dreht das Diagramm relativ zum Fenster nach Drücken der linken Maustaste und Ziehen der Maus. Die Funktion wird in der Statusleiste des Commander-Fensters angezeigt.

Zoom: Zoomt das Diagramm im Verhältnis zur Fenstergröße nach Drücken der linken Maustaste und Ziehen der Maus. Die Funktion wird in der Statusleiste des Graph Commanders angegeben.

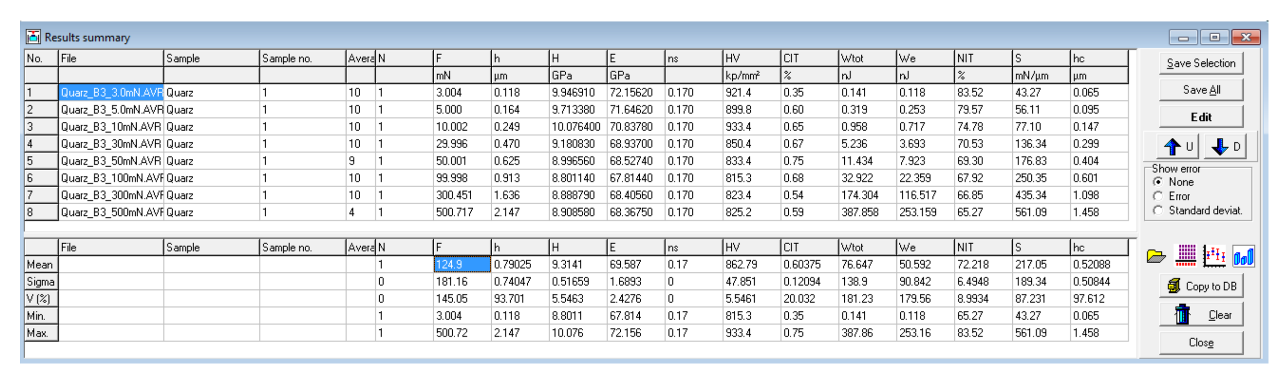
3.7 Results Die Ergebnistabelle

3.7.1 Arbeit mit der Tabelle

Die Tabelle im Fenster **Results summary** fasst alle Ergebnisse für diejenigen Parameter zusammen, die in der Konfiguration ausgewählt wurden. Die Symbole für die Kopfzeilen werden ebenfalls in der Konfiguration definiert. Jedes Mal, wenn eine Messung ausgewertet wird, wird mindestens eine neue Zeile in der Tabelle erzeugt. Dadurch erhöht sich die Zahl der Zeilen bis die Tabelle gelöscht oder das Programm geschlossen wird.

Die Tabelle wird nur für die Auswertung von Härtemessungen mit dem *Average results* Fenster oder für die Auswertung von Scratchtests verwendet. Für andere Messverfahren kommt sie nicht zur Anwendung.

Wenn eine Statistik erstellt wurde, besteht das Fenster aus zwei Tabellen (Abb. 30), ansonsten ist nur die obere Tabelle zu sehen.



Results summary

No.	File	Sample	Sample no.	Avera	N	F	h	H	E	ns	HV	CIT	Wtot	We	NIT	S	hc
						mN	µm	GPa	GPa		kp/mm²	%	nJ	nJ	%	mN/µm	µm
1	Quarz_B3_3.0mN.AVR	Quarz	1	10	1	3.004	0.118	9.946910	72.15620	0.170	921.4	0.35	0.141	0.118	83.52	43.27	0.065
2	Quarz_B3_5.0mN.AVR	Quarz	1	10	1	5.000	0.164	9.713380	71.64620	0.170	899.8	0.60	0.319	0.253	79.57	56.11	0.095
3	Quarz_B3_10mN.AVR	Quarz	1	10	1	10.002	0.249	10.076400	70.83780	0.170	933.4	0.65	0.958	0.717	74.78	77.10	0.147
4	Quarz_B3_30mN.AVR	Quarz	1	10	1	29.996	0.470	9.180830	68.93700	0.170	850.4	0.67	5.236	3.693	70.53	136.34	0.299
5	Quarz_B3_50mN.AVR	Quarz	1	9	1	50.001	0.625	8.996560	68.52740	0.170	833.4	0.75	11.434	7.923	69.30	176.83	0.404
6	Quarz_B3_100mN.AVF	Quarz	1	10	1	99.998	0.913	8.801140	67.81440	0.170	815.3	0.68	32.922	22.359	67.92	250.35	0.601
7	Quarz_B3_300mN.AVF	Quarz	1	10	1	300.451	1.636	8.888790	68.40560	0.170	823.4	0.54	174.304	116.517	66.85	435.34	1.098
8	Quarz_B3_500mN.AVF	Quarz	1	4	1	500.717	2.147	8.908580	68.36750	0.170	825.2	0.59	387.858	253.159	65.27	561.09	1.458

	File	Sample	Sample no.	Avera	N	F	h	H	E	ns	HV	CIT	Wtot	We	NIT	S	hc
Mean					1	124.9	0.79025	9.3141	69.587	0.17	862.79	0.60375	76.647	50.592	72.218	217.05	0.52088
Sigma					0	181.16	0.74047	0.51659	1.6893	0	47.851	0.12094	138.9	90.842	6.4948	189.34	0.50844
V (%)					0	145.05	93.701	5.5463	2.4276	0	5.5461	20.032	181.23	179.56	8.9934	87.231	97.612
Min.					1	3.004	0.118	8.8011	67.814	0.17	815.3	0.35	0.141	0.118	65.27	43.27	0.065
Max.					1	500.72	2.147	10.076	72.156	0.17	933.4	0.75	387.86	253.16	83.52	561.09	1.458

Abb. 30: Das Results summary Fenster

Save Selection: Speichert die Werte aus einem Teilbereich der Tabelle, der mit der Maus markiert wird, in einem Text- oder EXCEL-File.

Save All: Speichert alle Werte der Tabelle einschließlich der Statistiktabelle, sofern sie existiert, in einem Text- oder EXCEL-File.

Open : Ermöglicht das Wiedereinlesen von Tabellendaten im Textformat. Auf diese Weise können Datentabellen zu einem späteren Zeitpunkt erweitert werden. Es werden nur die Spalten eingelesen, die in der der Tabelle schon dargestellt sind.

Clear **:** Löscht die gesamte Tabelle und entfernt die Statistiktabelle

H	E	ns	HV
GPa	GPa		kp/mm
9.946910	72.15620	0.170	921.4
9.7			8
10.(			4
9.1			4
8.9			4
8.801140	67.81440	0.170	815.3

Delete Rows
Delete Columns
Copy to Clipboard

Zeilen löschen: Felder in ein oder mehreren Zeilen markieren und mit der rechten Maustaste klicken. Auswahl von *Delete rows*.

Spalten löschen: Felder in ein oder mehreren Spalten markieren und mit der rechten Maustaste klicken. Auswahl von *Delete Columns*.

Kopieren in die Zwischenablage: Einzelne oder benachbarte Felder markieren, dann mit der rechten Maustaste auf die markierten Felder klicken und wählen *Copy to Clipboard*.

Umsortieren von Zeilen und Spalten: Die Anordnung der Zeilen und Spalten kann verändert werden, um Präsentation an die eigenen Zwecke anzupassen. Um eine Tabellenzeile nach oben oder unten zu verschieben, markieren Sie ein Element dieser Zeile und klicken auf die Schaltflächen U (**U**p) oder D (**D**own). Die Anordnung der Spalten kann durch Ziehen der Spaltenüberschrift mit der Maus geändert werden. Die Spalte wird durch eine fette Linie markiert.

F	H	h
mN	GPa	µm
10,004	22,10	0,140
30,009	25,06	0,257
50,013	24,80	0,340
100,023	24,07	0,493
300,157	23,93	0,886
500,216	22,24	1,155

F	h	H
mN	µm	GPa
10,004	0,140	22,10
30,009	0,257	25,06
50,013	0,340	24,80
100,023	0,493	24,07
300,157	0,886	23,93
500,216	1,155	22,24

Mit Klick auf die Schaltfläche ***Edit*** kann der Inhalt von Zellen in der Tabelle geändert werden. Die Worte auf der Schaltfläche ändern sich in **Stop edit**. Klicken Sie nach der Änderung wieder auf die Schaltfläche, um die Bearbeitung zu beenden.

Als Standard werden alle Ergebnisse ohne Fehler angezeigt. Der Fehler kann nur angegeben werden, wenn gemittelte Kurven ausgewertet werden. The Spalten **Average of** sollten eine größere Zahl als 1 anzeigen. In diesem Fall können die statistischen Fehler (*Error*) oder die Standardabweichung (*Sigma*; *SD* = **S**tandard **D**eviation) von Kraft und Tiefe (nur für diese zwei Parameter) durch Markieren der Felder

Show error
None
Error
Sigma (SD)

Error or *Sigma (SD)* im Kasten **Show error** angezeigt werden. Markieren Sie das Feld *None*, um die Daten auszublenden.

Die Spaltenbreite kann am einfachsten geändert werden, indem die Maus auf der Linie zwischen zwei Spalten im Tabellenkopf positioniert und die Linie an die gewünschte Position gezogen wird.

Calculation of average and standard deviation : Durch Anklicken dieser Schaltfläche wird unter der Ergebnistabelle eine zweite Tabelle erzeugt, die folgende Werte angibt:

Mean: Mittelwert jeder Spalte
Sigma: Standardabweichung jeder Spalte
V (%): Variationskoeffizient = Standardabweichung dividiert durch den Mittelwert in Prozent
Min.: Minimalwert jeder Spalte
Max.: Maximalwert jeder Spalte

Bei Spalten ohne Zahlen wird nichts angegeben.

Die Anordnung der Spalten und ihre Größe ist dieselbe wie in der Tabelle darüber. Wenn Größe oder Anordnung der Spalten geändert wurde, drücken Sie nochmals die Schaltfläche , um dieselbe Tabellenstruktur in der Statistiktabelle zu reproduzieren.

3.7.2 Erstellen einer Grafik aus der Ergebnistabelle

Es ist möglich, direkt aus der Ergebnistabelle Grafiken im Fenster **Comparison** zu erzeugen. Dies kann genutzt werden, um eine Grafik für die Härte oder den Elastizitätsmodul über der Eindringtiefe zu erstellen.

Klicken Sie zu diesem Zweck auf die Schaltfläche ***Add column data to comparison graph window*** . Das Fenster **Data selection for Graph** erscheint.

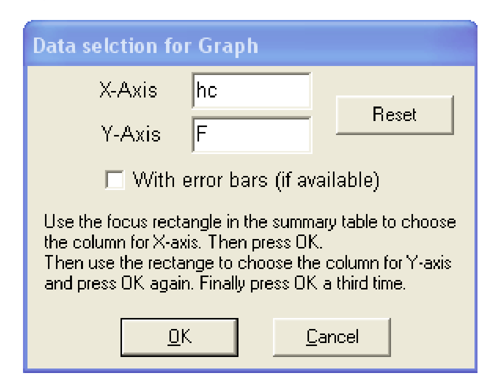


Abb. 31: Fenster Data selection for Graph

Als X-Achse (X-Axis) wird eine Spalte der Ergebnistabelle ausgewählt, indem ein beliebiges Feld dieser Spalte angeklickt wird (blau markiert) und man anschließend im Fenster **Data Selection for Graph** die Schaltfläche ***OK*** drückt. Die Auswahl der Y-Achse erfolgt in der gleichen Weise.

Dabei ist zu beachten: Wenn nur **ein Feld** der Spalte markiert wird, werden **alle** Felder der Spalte für die Grafik verwendet, d.h. wenn mindestens 2 Felder oder mehr markiert werden, werden nur diese Felder für die Grafik verwendet.

Sollen die Fehlerbalken im Ergebnisdiagramm mit dargestellt werden, falls Fehlerangaben verfügbar sind, wird das Feld *With error bars (if available)* mit einem Häkchen markiert.

Anschließend wird die Schaltfläche ***OK*** nochmals gedrückt, um das Diagramm im Fenster **Comparison** anzuzeigen.

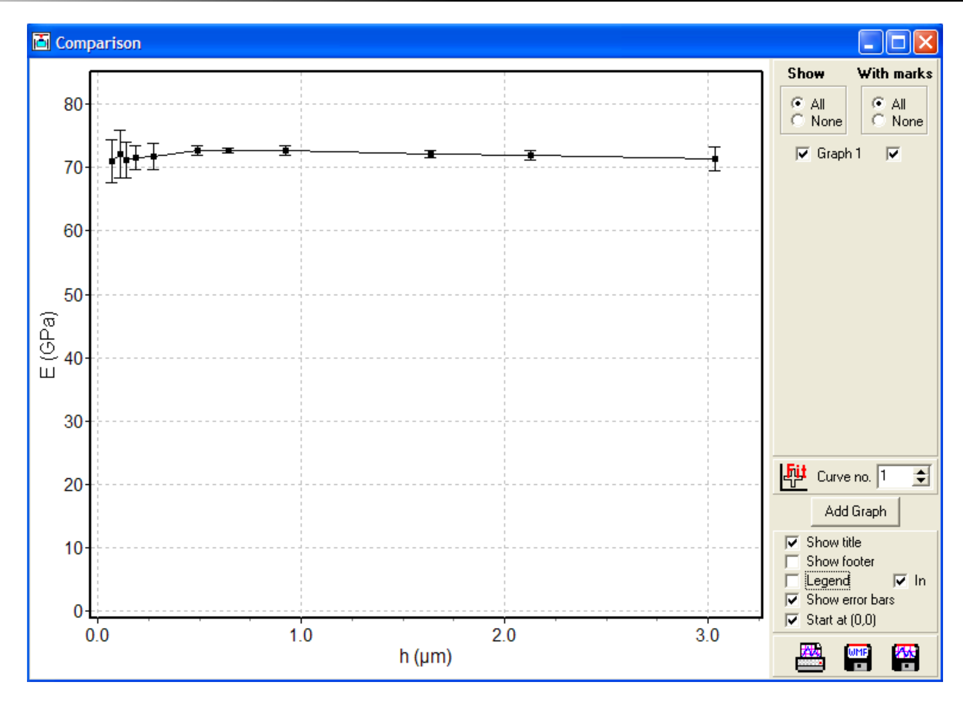


Abb. 32: Kurve im Vergleichsfenster, die aus der Ergebnistabelle erzeugt wurde

3.7.3 Darstellung der Ergebnisse als 3D-Grafik oder als Kontur-Plot

Mit der Schaltfläche öffnet sich das Fenster **3D result presentation** und alle in der Ergebnistabelle enthaltenen Werte für die Härte werden an den Relativ-Koordinaten der Messung als Säulen dargestellt.

Achtung: ***Diese Funktion arbeitet nur richtig, wenn die Messungen in beiden Richtungen in einem gleichmäßigen Raster durchgeführt wurden.*** Der Abstand zwischen den Messpositionen muss konstant (z.B. 50µm) sein. Der Rasterabstand für X- und Y-Richtung kann jedoch unterschiedlich sein.

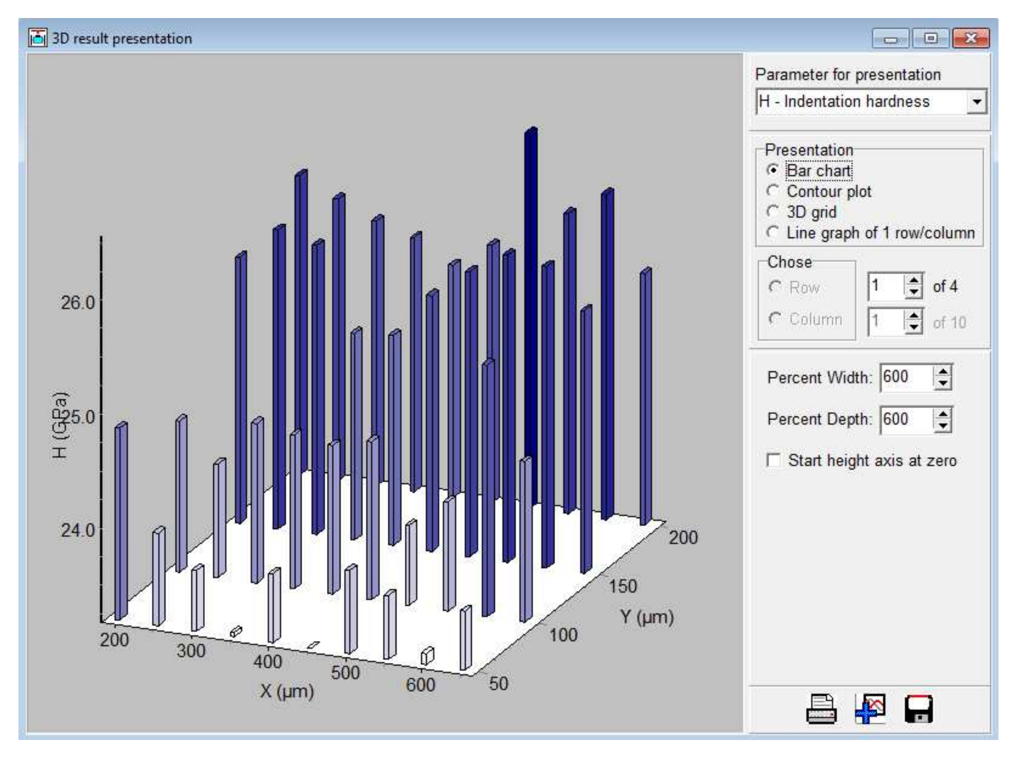


Abb. 33: Das Fenster 3D result presentation

Parameter for presentation: Mit diesem drop-down Menü kann die Größe ausgewählt werden, die im der Grafik dargestellt werden soll. Die Standard-Einstellung ist *Indentation hardness*

Parameter for presentation
H - Indentation hardness
F - Maximum normal test forc
h - Maximum normal displace
H - Indentation hardness
E - Indentation modulus (Your
Er - Reduced modulus
E* - Plain strain modulus (witl
ns - Sample Poisson´s ratio
Ei - Indenter Young´s modulus
ni - Indenter Poisson´s ratio
HM - Martens hardness
HMs - Martens hardness from
HV - Equivalent Vickers hardn

Percent Width: definiert eine relative Größe für die Breite der Balken

Percent Depth: definiert eine relative Größe für die Tiefe der Balken

Start height axis at zero: Beendet die automatisch Skalierung der linken Achse und beginnt die Darstellung bei Null.

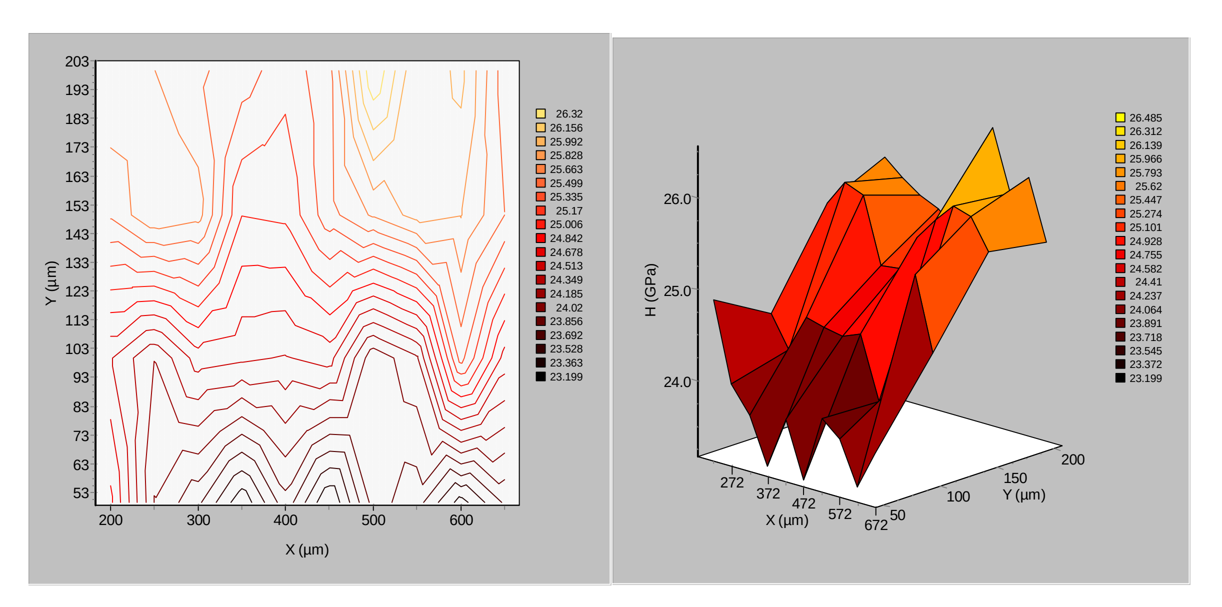


Abb. 34: Darstellung von Ergebnissen als Contour Plot (links) oder als 3D-Gitter(rechts)

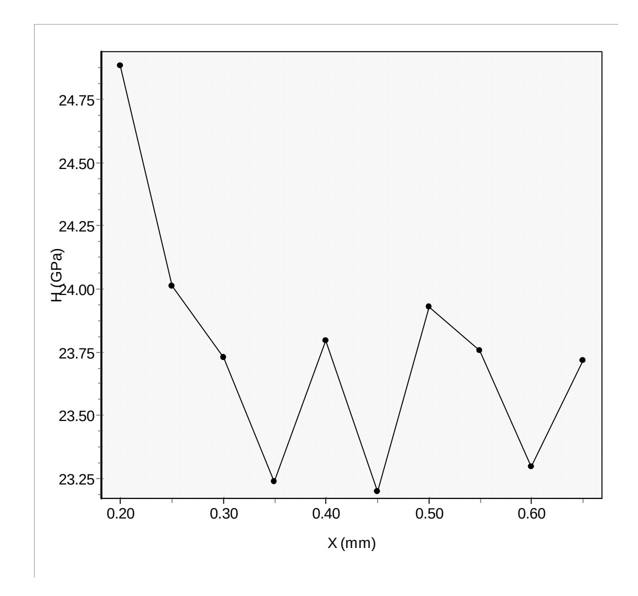


Abb. 35: Darstellung der Ergebnisse als Liniengrafik (2D)

Presentation: Ändert die Art der Darstellung

Contour plot: Es werden Höhenlinien für Bereiche gleicher Härte (oder anderer Werte) gezeichnet, s. Abb. 34

3D grid: Die Ergebnisse werden als dreidimensionales Gitter dargestellt

Line graph of 1row/column: Einzelne Zeilen oder spalten können für die Darstellung in 2D-Form ausgewählt werden. Die Auswahl der Zeile erfolgt über die Auswahl *Choose row* und die Eingabe der Zeilennummer. Die Auswahl der Spalte erfolgt über *Choose column*.

3.8 Erstellen eines Reports

3.8.1 Formatieren des Reports

Ein Report kann erzeugt werden, wenn mindestens ein Eintrag in der Ergebnistabelle vorhanden ist.

Durch Klicken der Schaltfläche ***Report*** erscheinen zwei Fenster:

Report Preparation (klein) und

Measurement Report Preview (Vorschaufenster im Hintergrund).

Die Einstellungen für die im Report dargestellten Inhalte werden im Fenster *Report Preparation* vorgenommen, das mehrere Seiten enthält.

Seite ***Results:*** Auf dieser Seite wird durch das Setzen von Häkchen festgelegt, welche Größen im Report dargestellt werden sollen. Dies sind standardmäßig die Größen, die auch in der Ergebnistabelle angezeigt werden. Man hat jedoch Zugriff zu allen verfügbaren Größen.

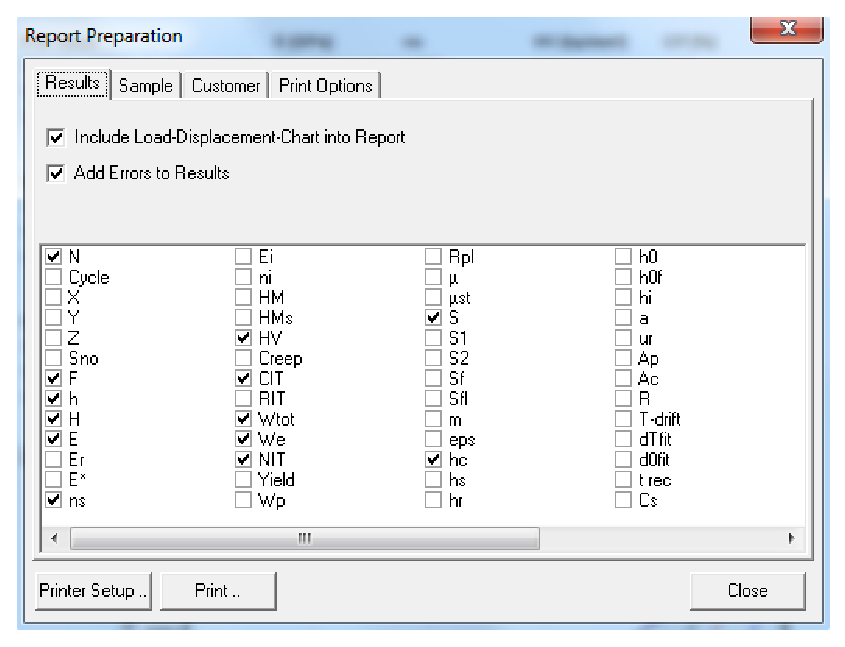


*Abb. 36: Seite **Results** des Report Preparation Fenster*

Im oberen Teil kann man durch Häkchen auswählen, ob

- Eine Grafik der Messkurven im Report dargestellt wird (Include Load-Displacement-Chart into Report).
- Die Fehlerangaben in den Report aufgenommen werden (Add Errors to Results).

Alle Änderungen werden sofort im Vorschaufenster aktiv. Hier kann man prüfen, ob die Formatierung geeignet ist.

Seite **Sample:** Diese Seite enthält bereits alle Informationen, die zu der Probe verfügbar sind. Es sind diejenigen, die vor der Messung im Fenster *Sample Data* festgelegt wurden.

Durch Setzen von einem Häkchen bei *Include into Report* wird festgelegt, dass die Probenangaben in den Report aufgenommen werden.

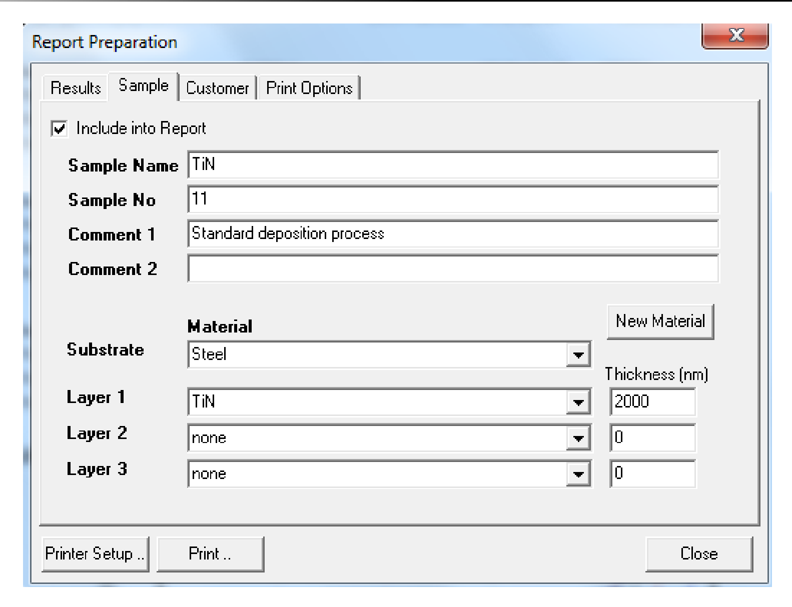


*Abb. 37: Seite **Sample** des Report Preparation Fenster*

Der Kopf des Reports sieht dann folgendermaßen aus:

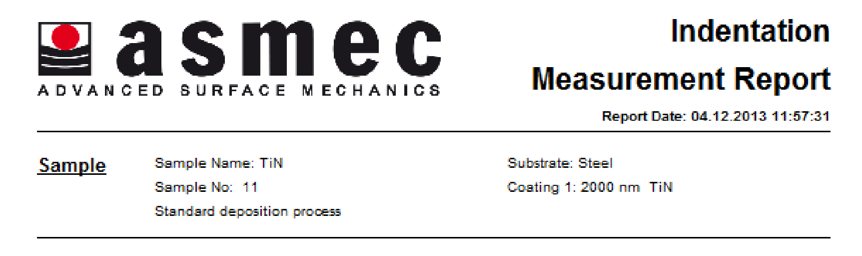


Abb. 38: Report-Kopf mit Probendaten

Seite **Customer:** Auf dieser Seite können Daten zum Kunden eingetragen werden. Sie werden automatisch im Programm gespeichert und stehen beim nächsten Aufruf wieder zur Verfügung. Es kann immer nur ein Kunde definiert werden.

Durch Setzen von einem Häkchen bei *Include into Report* wird festgelegt, dass die Kundenangaben in den Report aufgenommen werden.

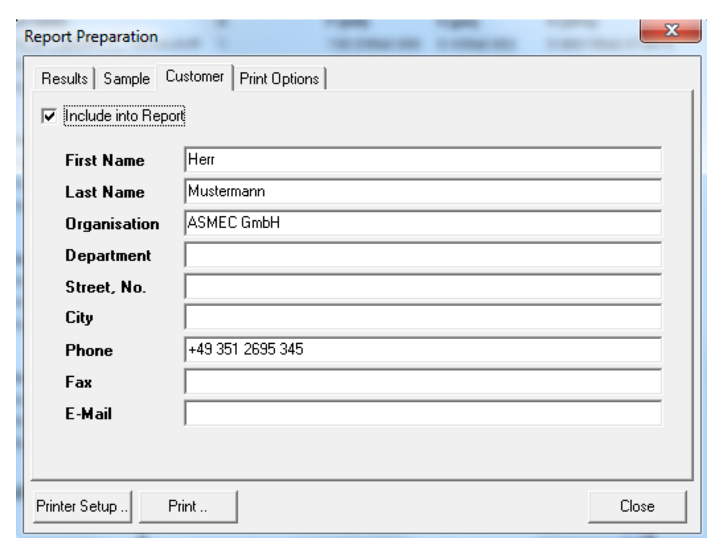


*Abb. 39: Seite **Customer** des Report Preparation Fenster*

Seite **Print options:** Auf dieser Seite werden Einstellungen für die Formatierung der Seite und den Druck vorgenommen. Alle Maße sind in mm einzutragen.

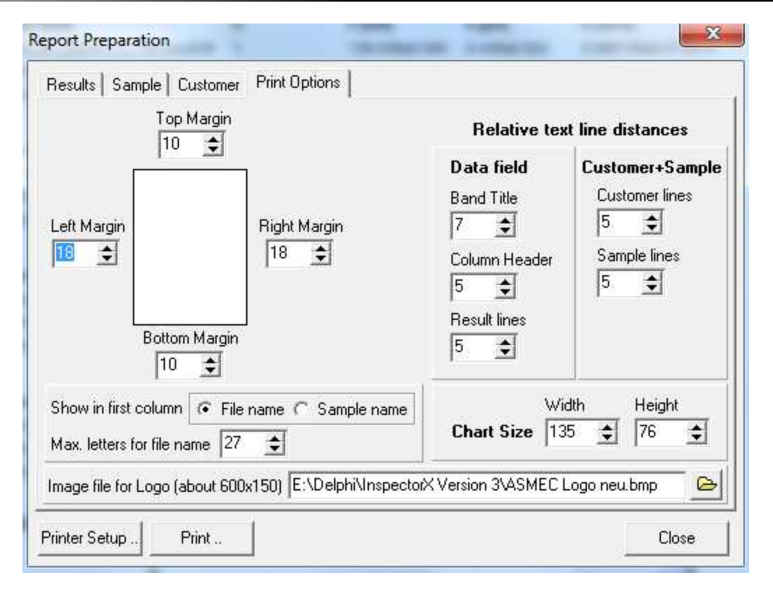


*Abb. 40: Seite **Print options** des Report Preparation Fenster*

Top Margin: oberer Seitenrand
Bottom Margin: unterer Seitenrand
Left Margin: linker Seitenrand
Right Margin: rechter Seitenrand

Relative text line distances:

Band Title: Breite des Zwischenraum in mm zwischen der Überschrift (z.B. **Results)** und der Kopfzeile (z.B. File name) der Tabelle bzw. Verbreiterung des Abstandes zwischen den Zeilengruppen
Column Head: Abstand zwischen der Kopfzeile der Tabelle (z.B. File name) und der ersten Datenzeile
Values: Abstand zwischen den Tabellenzeilen (Daten)
Customer lines: Abstand zwischen den Zeilen der Kundenangaben
Sample lines: Abstand zwischen den Zeilen der Probenangaben

Chart Size: Definiert die Größe der Grafik mit den Kraft-Eindringtiefen-Kurven.

Width: Breite der Grafik
Height: Höhe des Grafik

Show in first line: Hier kann man auswählen, ob der Filename oder der Probenname als erste Spalte angezeigt wird.

Max. letters for file name: Definiert, wie viel Platz für den File- (oder Proben-) namen in der ersten Spalte bereitgestellt wird. Bei langen Filenamen kann es passieren, dass nicht der ganze Name angezeigt wird. Dann ist dieser Wert zu vergrößern. Umgekehrt kann viel Platz verschenkt werden, wenn der Filename kurz ist.

Image file for Logo: Das ASMEC Logo, das links oben auf der Seite angezeigt wird, kann durch ein eigenes Logo ersetzt werden. Hierfür ist eine Grafikdatei im BMP-Format einzulesen. Die Datei sollte ungefähr eine Größe von 600 x 150 Pixel haben. Bei Logos in einem anderen Seiten-zu-Höhen Verhältnis ist der rechtliche Platz mit weißer Fläche zu füllen.

3.8.2 Report Vorschau

Jede Änderung der Formatierung wird sofort im Vorschaufenster angezeigt.

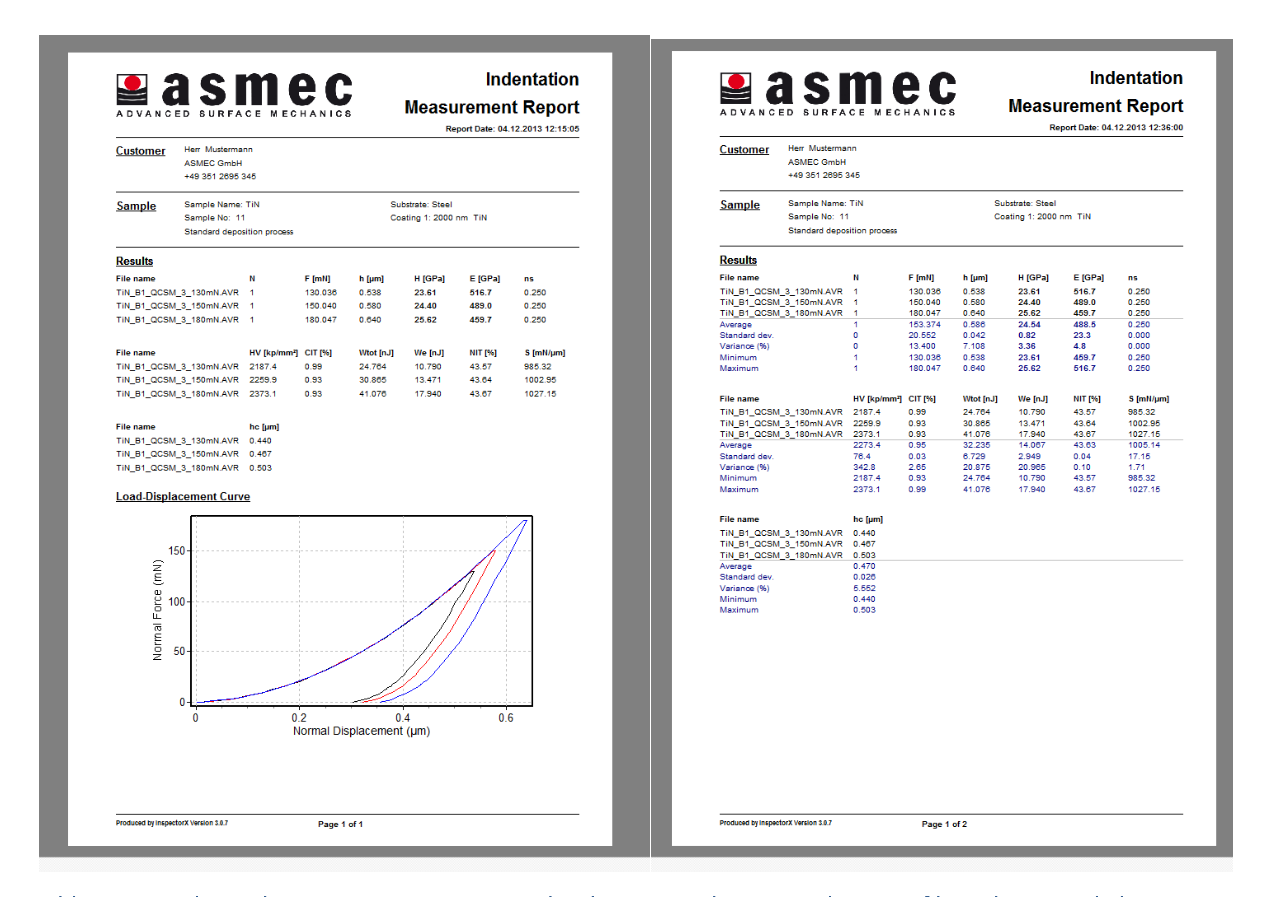
Die Größe der Seite in der Vorausschau kann durch einen Doppelklick außerhalb der Seite im grauen Bereich vergrößert oder verkleinert werden. Wenn der Report größer als eine Seite ist, können weitere

Seiten mit den Tasten Page up und Page down oder durch Scrollen der Verschiebeleiste um unteren Bildschirmrand erreicht werden.

Die normale Oberfläche des Programms wird erst wieder sichtbar, wenn der Report mit der Schaltfläche ***Close*** im Fenster **Report Preparation** geschlossen wird.

Wenn in der Ergebnistabelle eine Statistik berechnet wurde, werden auch die Statistikwerte (Mittelwert, Standardabweichung u.s.w.) für jede Spalte ausgegeben. Vor den Statistikwerten erscheint eine graue Linie zur optischen Abtrennung.

Durch Anklicken der Schaltfläche ***Printer Setup*** wird das Fenster **Druckeinrichtung** geöffnet.



asmec ADVANCED SURFACE MECHANICS

Indentation Measurement Report

Report Date: 04.12.2013 12:15:05

Customer: Herr Mustermann, ASMEC GmbH, +49 351 2695 345

Sample: Sample Name: TiN; Sample No: 11; Standard deposition process; Substrate: Steel; Coating 1: 2000 nm TiN

Results

File name	N	F [mN]	h [µm]	H [GPa]	E [GPa]	ns
TiN_B1_QCSM_3_130mN.AVR	1	130.036	0.538	23.61	516.7	0.250
TiN_B1_QCSM_3_150mN.AVR	1	150.040	0.580	24.40	489.0	0.250
TiN_B1_QCSM_3_180mN.AVR	1	180.047	0.640	25.62	459.7	0.250

File name	HV [kp/mm²]	CIT [%]	Wtot [nJ]	We [nJ]	NIT [%]	S [mN/µm]
TiN_B1_QCSM_3_130mN.AVR	2187.4	0.99	24.764	10.790	43.57	985.32
TiN_B1_QCSM_3_150mN.AVR	2259.9	0.93	30.865	13.471	43.64	1002.95
TiN_B1_QCSM_3_180mN.AVR	2373.1	0.93	41.076	17.940	43.67	1027.15

File name	hc [µm]
TiN_B1_QCSM_3_130mN.AVR	0.440
TiN_B1_QCSM_3_150mN.AVR	0.467
TiN_B1_QCSM_3_180mN.AVR	0.503

Load-Displacement Curve

Produced by InspectorX Version 3.0.7 — Page 1 of 1

asmec ADVANCED SURFACE MECHANICS

Indentation Measurement Report

Report Date: 04.12.2013 12:36:00

Customer: Herr Mustermann, ASMEC GmbH, +49 351 2695 345

Sample: Sample Name: TiN; Sample No: 11; Standard deposition process; Substrate: Steel; Coating 1: 2000 nm TiN

Results

File name	N	F [mN]	h [µm]	H [GPa]	E [GPa]	ns
TiN_B1_QCSM_3_130mN.AVR	1	130.036	0.538	23.61	516.7	0.250
TiN_B1_QCSM_3_150mN.AVR	1	150.040	0.580	24.40	489.0	0.250
TiN_B1_QCSM_3_180mN.AVR	1	180.047	0.640	25.62	459.7	0.250
Average	1	153.374	0.586	24.54	488.5	0.250
Standard dev.	0	20.552	0.042	0.82	23.3	0.000
Variance (%)	0	13.400	7.108	3.36	4.8	0.000
Minimum	1	130.036	0.538	23.61	459.7	0.250
Maximum	1	180.047	0.640	25.62	516.7	0.250

File name	HV [kp/mm²]	CIT [%]	Wtot [nJ]	We [nJ]	NIT [%]	S [mN/µm]
TiN_B1_QCSM_3_130mN.AVR	2187.4	0.99	24.764	10.790	43.57	985.32
TiN_B1_QCSM_3_150mN.AVR	2259.9	0.93	30.865	13.471	43.64	1002.95
TiN_B1_QCSM_3_180mN.AVR	2373.1	0.93	41.076	17.940	43.67	1027.15
Average	2273.4	0.95	32.235	14.067	43.63	1005.14
Standard dev.	76.4	0.03	6.729	2.949	0.04	17.15
Variance (%)	342.8	2.65	20.875	20.965	0.10	1.71
Minimum	2187.4	0.93	24.764	10.790	43.57	985.32
Maximum	2373.1	0.99	41.076	17.940	43.67	1027.15

File name	hc [µm]
TiN_B1_QCSM_3_130mN.AVR	0.440
TiN_B1_QCSM_3_150mN.AVR	0.467
TiN_B1_QCSM_3_180mN.AVR	0.503
Average	0.470
Standard dev.	0.026
Variance (%)	5.552
Minimum	0.440
Maximum	0.503

Produced by InspectorX Version 3.0.7 — Page 1 of 2

Abb. 41: Druckvorschau im Report-Fenster. Links ohne Statistikwerte und mit Grafik, rechts umgekehrt.

4 Einlesen und Korrigieren von Daten

4.1 Filetypen

DAT – Standard-Datenformat einer einzelnen Messung von IndentAnalyser. Das Datenformat und die Endung der Filebezeichnung (Extension) der Rohdaten hängen vom gewählten Gerätetyp ab. Bei anderen Geräten lautet die Endung oft auf DAT oder TXT.

AVR – Average data file. Enthält die **gemittelten und korrigierten** Kraft-, Verschiebungs- und Zeit-Daten mehrerer Messungen mit gleicher Maximalkraft und gleicher Zyklenzahl, die Standardabweichungen für jeden Messpunkt einschließlich der Messbeschreibung, Probenbezeichnung, Flächenfunktion, Gerätesteifigkeit und anderer Parameter. Dieses Dateiformat wird durch die IndentAnalyser oder IndentAnalyser Software erzeugt.

DAA – Multi measurement data file. DAA-Files enthalten die bezüglich Nullpunkt und thermischer Drift **korrigierten** Kraft-, Verschiebungs- und Zeitdaten von einer beliebigen Zahl von Einzelmessungen inclusive Messbeschreibung, Probenbezeichnung, Flächenfunktion, Gerätesteifigkeit und anderer Parameter. Dieses Dateiformat wird durch die die IndentAnalyser oder IndentAnalyser Software erzeugt.

DAK – Temporäre Rohdatenfiles nach Korrektur von Nullpunkt oder thermischer Drift. Sie werden normalerweise automatisch nach Verwendung gelöscht.

REF – (nur UNAT) Lateral reference data file. In ihm werden die Messungen zur Bestimmung der lateralen Federsteife abgelegt, die vor jeder Messserie mit Lateralkraft durchgeführt werden. Ab Version 3 dient es nur noch für Vergleiche und Dokumentation. Die Daten zur Federsteife wurden nun mit im DAT-File gespeichert.

SCN – (nur UNAT) Datenfile von Oberflächenscans zur Ermittlung von Rauheit oder Profil.

Von den Rohdaten als auch von den AVR-Files können beliebig viele Dateien gleichzeitig eingelesen werden.

4.2 *Einlesen und Darstellen von Messdaten*

Alle Daten sind ohne Korrektur der Gerätesteife gespeichert. Die Korrektur erfolgt sofort beim Einlesen entsprechend der Formel $h_{kor} = h - C(F) \cdot F$

h_{kor} – korrigierte Eindringtiefe
h – gemessene Eindringtiefe
F – Kraft
C – kraftabhängige Gerätenachgiebigkeit

Beim Speichern von Daten wird diese Korrektur wieder aufgehoben. Sollen Daten ohne Korrektur dargestellt werden, muss eine unendliche (sehr große) Gerätesteife in der Konfiguration eingestellt werden.

Das Einlesen erfolgt über die Schaltfläche ***Open*** 🗁 oder den Menüpunkt ***File → Open Data File***. Im Fenster **Öffnen/Open** wird der Filetyp unter Objekttyp ausgewählt und das entsprechende File geöffnet.

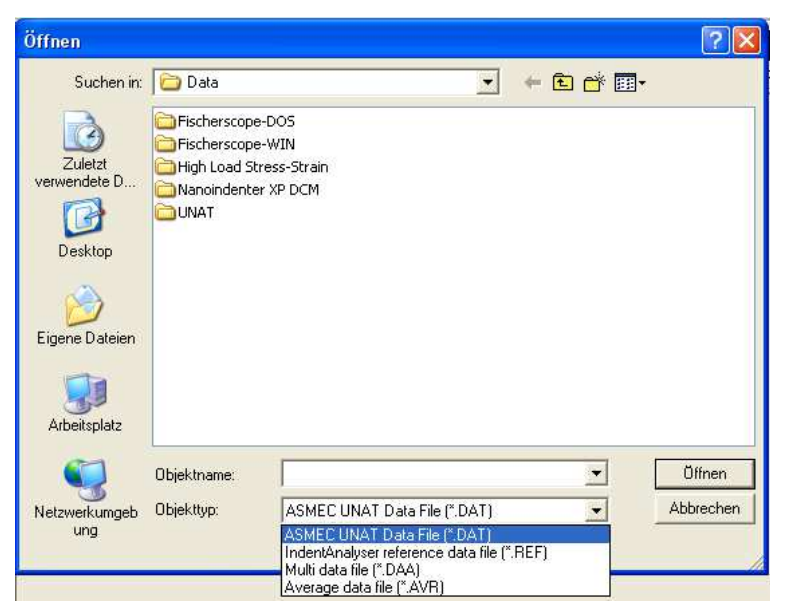


Abb. 42: Dialogfenster für die Auswahl von Datenfiles

Nach dem Start einer Messung oder nach dem Einlesen einer Datei wird im linken Teil des Bildschirms das Fenster **Information** mit der Messpunktnummer und den Punktkoordinaten angezeigt. Im rechten Fenster **Measurement data** werden die Messkurve sowie alle einzelnen Datensätze in einer Tabelle dargestellt. Der Dateiname wird in der Fensterüberschrift angegeben. Die Tabelle zeigt

- N - Messpunktnummer
- F (mN) - Kraft F
- h (µm) - Verschiebung
- t (s) - Zeit .

Die Maßeinheiten sind abhängig von der in der Konfiguration getroffenen Auswahl.

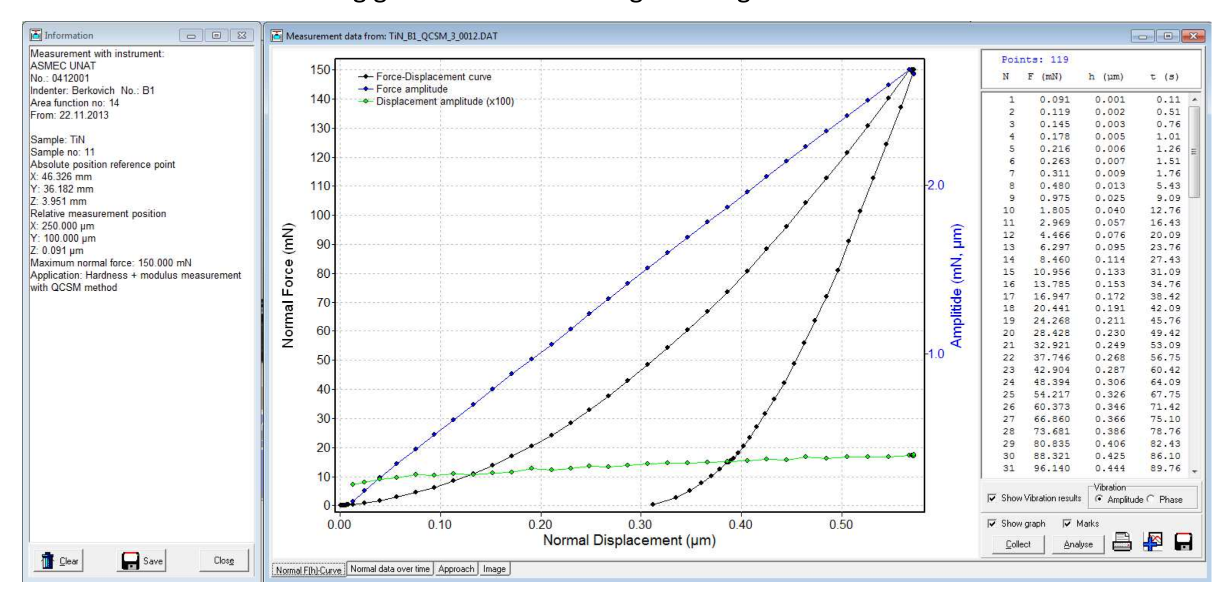


Abb. 43: **Information** Fenstermit Angaben zu den Messungen und **Measurement data** Fenster mit der Messkurve

Sofern in einem dynamischen Mode gemessen wurde, werden auch die Messkurven für die Kraft- und Wegamplitude dargestellt. Es kann zwischen der Darstellung der *Amplituden* und der *Phasen* umgeschaltet werden.

Nach Abschluss der Messung sind alle Messpunkte in der Tabelle aufgelistet.

Durch Entfernen des Häkchens im Feld *Show graph* wird die Messkurve ausgeblendet.

Ein Häkchen im Feld *Marks* bewirkt die Anzeige der Messpunkte.

Mit **Collect** wird die Messkurve in das Fenster *Data overview* kopiert. Dort kann man mehrere Messkurven sammeln, die dann zusammen ausgewertet und eventuell vorher gemittelt werden.

Analyse startet die Auswertung der Messung, die im Fenster angezeigt wird. Es hängt von den Einstellungen im *Konfigurationsfenster* auf der Seite *Analysis normal* ab, ob die Nullpunktkorrektur und die thermische Driftkorrektur manuell oder automatisch durchgeführt werden. Bei manueller Ausführung werden sie entsprechenden Fenster angezeigt und man muss OK drücken. Bei automatischer Auswertung wird das entsprechende Auswertefenster angezeigt. Bei Härtemessungen ist dies das **Average results** Fenster.

Beim Klicken auf ***Print*** wird die Grafik auf dem Standarddrucker ausgedruckt.

Beim Klicken auf ***Add Graph*** werden alle Kurven der Grafik in das Fenster **Comparison** kopiert. Falls das Fenster noch nicht existiert, wird es automatisch geöffnet.

Mit ***Save*** wird der **Dateispeicherdialog** geöffnet. Die Daten der angezeigten Messkurve werden abgespeichert nach Auswahl einer der vier Datenformate:

- ASCII-Matrix mit Kopfzeilen [Dateierweiterung TXT]
- ASCII-Matrix ohne Kopfzeilen [Dateierweiterung ASC]
- EXCEL-File [Dateierweiterung XLS]
- Windows Meta File Format [Dateierweiterung WMF]

Hinweis: Alle Dateien enthalten lediglich zwei Datenreihen mit den X- und Y-Daten der sichtbaren Kurven. wenn auch die Zeiten, Steifigkeitswerte oder die Piezospannung abspeichern wollen, ist ***Save*** im Hauptmenü zu verwenden.



Seite Normal signals over time: Hier wird der zeitliche Verlauf der Messgrößen dargestellt. Außerdem kann die Piezo-Spannung (Piezo voltage) angezeigt werden, die für die Auswertung der Messdaten nicht benötigt wird.

Im Teilfenster **Measurement points** (Messpunkte) kann durch Setzen von Häkchen in den Feldern *Graphs* (Kurven) und Marks (Markierungen) festgelegt werden, welche Kurven gezeigt werden und ob Punktmarkierungen dargestellt werden.

Die Ordinate wird in beliebigen Einheiten **a.u.** (arbitrary units) angezeigt. Infolge der unterschiedlichen Einheiten kann es vorkommen, dass eine Kurve unter Nutzung der gesamten Grafikfläche dargestellt wird, während die anderen nahe Null liegen. Um die Sichtbarkeit der Kurven zu verbessern ist es möglich, sie automatisch oder manuell so zu skalieren, dass die Maxima und/oder Minima der Kurven übereinstimmen.

Auto scale: startet die automatische Skalierung. Der ermittelte Skalierungsfaktor wird in den Feldern **Factor** und in der Legende angezeigt. In der Legende werden auch die Maßeinheiten für die Kurven angegeben. Die Legende kann durch Festhalten der linken Maustaste und Ziehen im Diagramm beliebig positioniert werden.

Av. Force (mN x1)
Av. Displacement (µm x105,61)
Av. Voltage (V x3,7333)

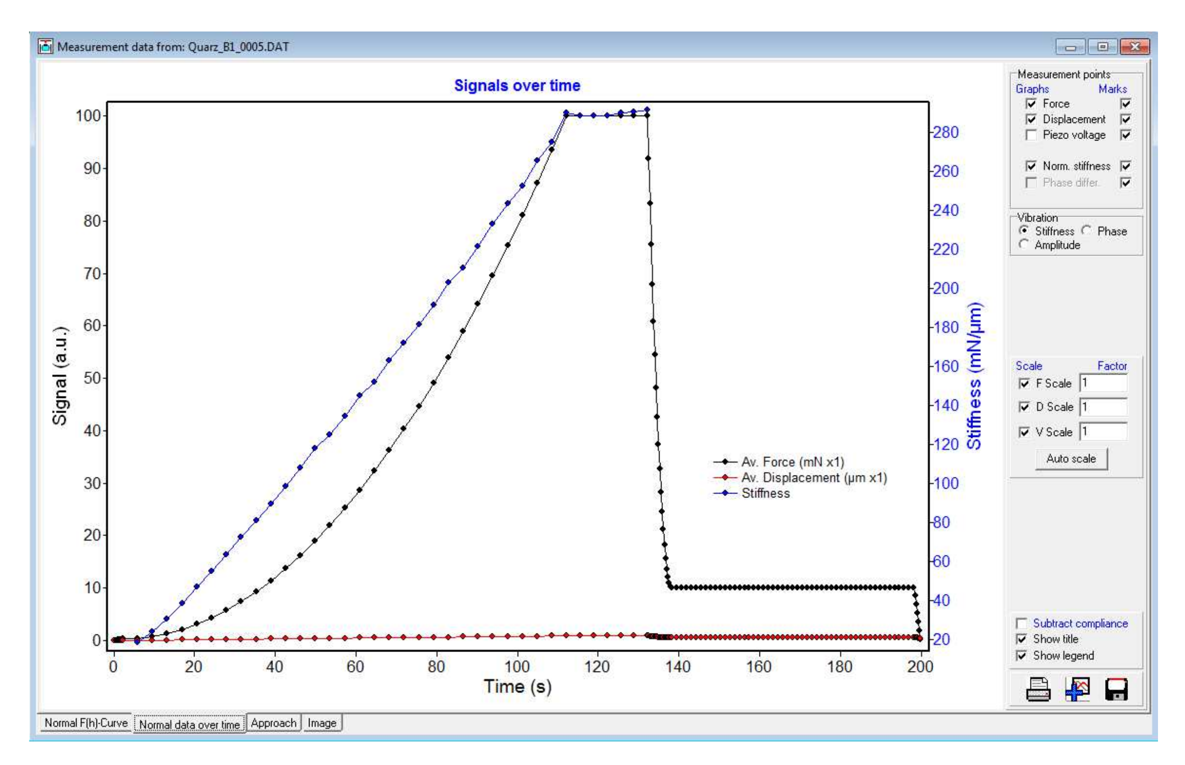
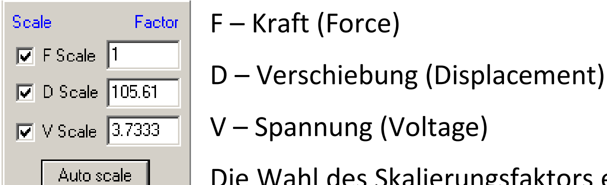


*Abb. 44: Die Seite **Normal data over time** im Fenster **Measurement data***

In den Feldern *Scale* wird durch Setzen von Häkchen eingestellt, welche Kurven skaliert werden sollen



F – Kraft (Force)

D – Verschiebung (Displacement)

V – Spannung (Voltage)

Die Wahl des Skalierungsfaktors erfolgt manuell durch Eintragen in das Felder *Factor*. Die Skalierung wird wirksam, wenn das Feld mit der TAB-Taste oder durch Klicken mit der Maus verlassen wird.

Im untersten Teilfenster kann durch das Setzen von Häkchen ausgewählt werden, ob das Kurvendiagramm eine Überschrift (Show title) oder eine Legende (Show legend) erhält.

Seite Approach: Hier werden die Kraft- und Wegdaten vom Approach-Segment dargestellt, in dem die Spitze mit Hilfe des Aktors nach unten fährt, um die Oberfläche zu suchen.

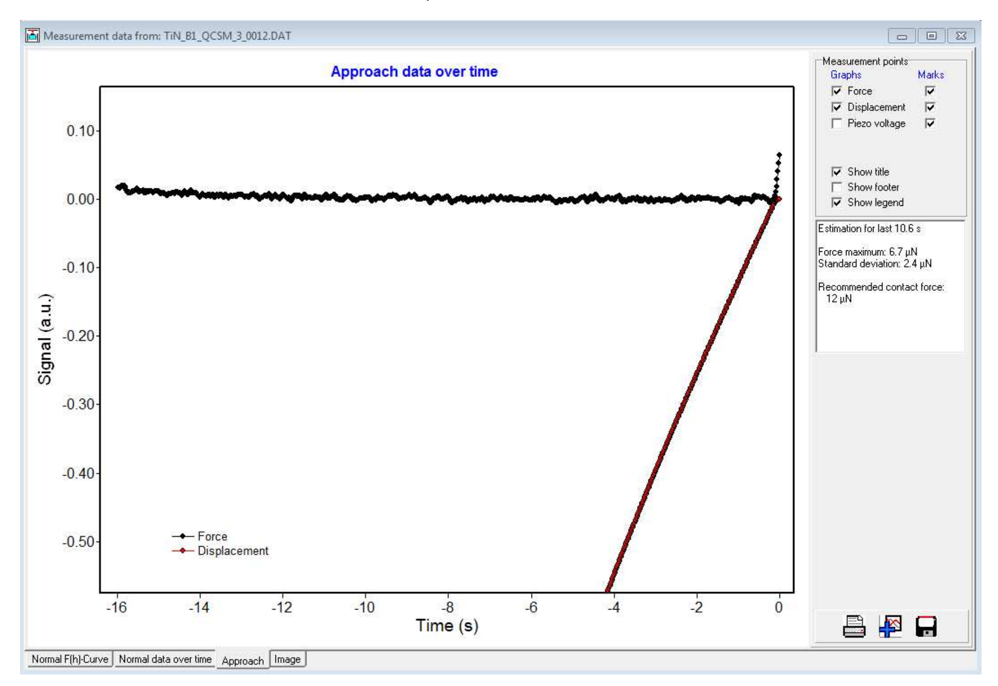


Abb. 45: Die Seite ***Approach*** *im Fenster* ***Measurement data***

Die Seite ist nicht zu sehen, wenn keine Approach-Daten vorliegen. Die rote Kurve mit den Displacement (Verschiebungs-) Daten zeigt den Abstand von der Oberfläche vor Kontakt.

Die Darstellung der Approach-Daten ist sehr hilfreich, um die Messbedingungen zu prüfen. Das Rauschen des Kraftsignals während der Annäherung der Spitze ist ein Kriterium für die Aufstellungsbedingungen und das Rauschverhalten der Elektronik. Aus ihm kann unmittelbar abgeleitet werden, welche Kontaktkraft für die Annäherung verwendet werden sollte. Dies wird im Feld rechts neben der Grafik angegeben.

Es werden annähernd die letzten 10s vor dem Auftreffen auf die Oberfläche analysiert. Der maximale Kraftwert und die Standardabweichung aller Werte in dieser Zeit werden angegeben. Daraus ergibt sich die **Recommended contact force**, die in Abb. 45 12µN beträgt.

Seite Image: Es ist möglich, an Datenfiles mit Messdaten bis zu 4 Bilder anzuhängen, die mit der InspectorX Software von ASMEC erstellt wurden. Dies erleichtert die Zuordnung von Bildern und Messdaten.

Die Bilder müssen im BMP-Format vorliegen und gleichzeitig muss ein Textfile mit den Bildparametern im selben Verzeichnis existieren, dass von InspectorX automatisch gespeichert wird. Die möglichen Bildgrößen sind rechts unten angegeben. Sie entsprechen den Größen der bisher vom UNAT eingesetzten Kameras.

Die Anzahl verfügbarer Bilder wird unter **Available images** angezeigt und das aktuelle Bild kann mit dem Auswahlfeld **Show image** ausgewählt werden.

Mit **Release image** können die Bilder wieder aus dem File entfernt werden. Im Informationsfeld werden einige Bildinformationen angegeben.

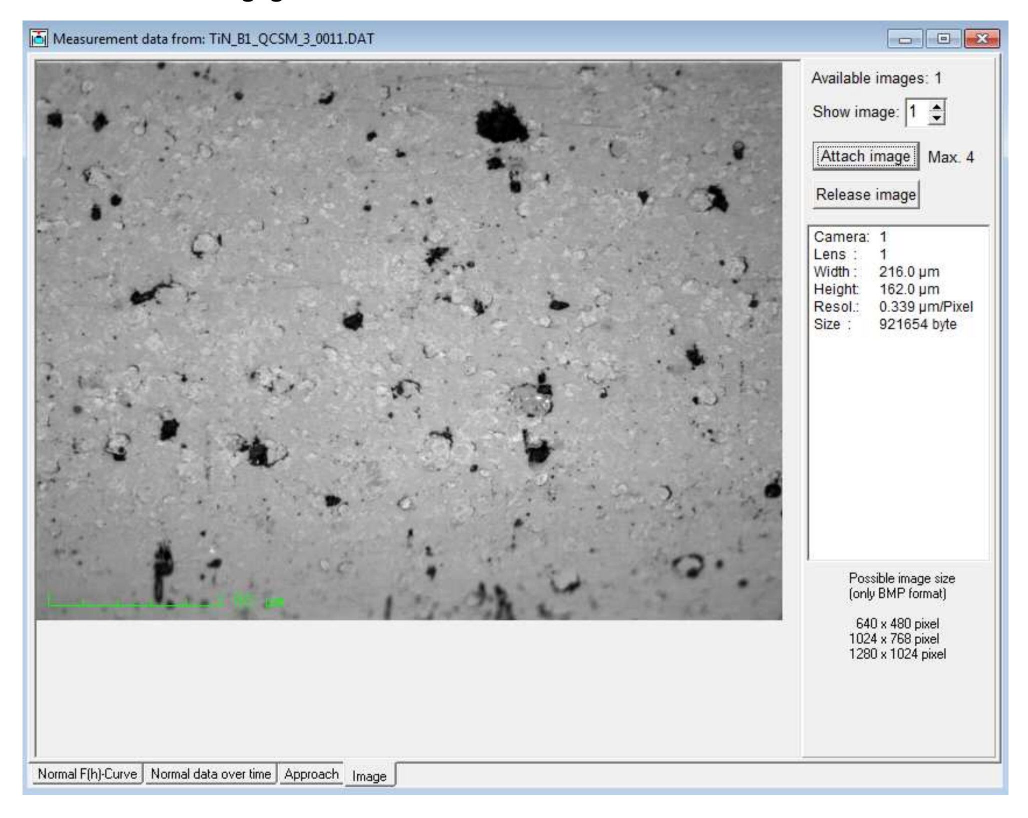


*Abb. 46: Die Seite **Image** im Fenster **Measurement data***

Wenn eine Messung mit Lateralkrafteinheit durchgeführt wurde, existieren zusätzlich die Seiten **Lateral F(h)-Curve** und **Lateral signals over time**. Sie haben die gleichen Funktionen wie die Seiten für die Normalkrafteinheit.

Wenn ein Scratchtest durchgeführt wurde erscheint zusätzlich die Seite Scratch results. Ihre Funktion wird bei der Auswertung von Scratchtests im Abschnitt 5.9 erläutert.

4.3 Nullpunktkorrektur

Die Kraft- und Verschiebungsdaten werden bereits während der Oberflächenfindung aufgezeichnet, wenn als erstes Segment im Messzyklus das Segment **Approach** gewählt wurde. Die vor dem Oberflächenkontakt erhaltenen Daten können dann für eine genauere Nullpunktkorrektur verwendet werden.

Da immer eine Kontaktkraft größer als Null notwendig ist, um die Oberfläche zu finden, ist auch **immer** eine Nullpunktkorrektur notwendig. Nur bei Messungen mit sehr großer Eindringtiefe kann eventuell darauf verzichtet werden, da der Fehler vernachlässigbar ist.

Um die Nullpunktkorrektur für eine Messung zu starten, wählen Sie die Registerkarte *Normal F(h)-Curve*) im Fenster **Measurement data** und klicken Sie auf die Schaltfläche ***Analyse***. Im Falle mehrerer Kurven wird dasselbe passieren, wenn Sie die Schaltfläche ***Start correction*** im Fenster **File selection analysis**

drücken. In diesem Fall muss die Nullpunktkorrektur aufeinanderfolgend für jede Messung durchgeführt werden.

Das Fenster **Zero point correction** (Nullpunktkorrektur) wird geöffnet und die ersten Datenpunkte der Messkurve und die letzten **50** Punkte des Approach-Segments werden zusammen mit einer grünen und einer lila Fitkurve angezeigt. Die Fitmethode wird in der Konfiguration ausgewählt und kann auch in den Fenstern **Zero point correction** selbst unter Verwendung der Optionsschaltflächen ***Fit method*** geändert werden. Normalerweise wird ein **Hertz'scher Kontakt** angenommen, wo die Last-Verschiebungs-Kurve der Beziehung $F = C*(h-h_0)^{1.5}$ folgt.

Die Kurve wird durch eine Änderung des Wertes h_0 nach links oder rechts verschoben, bis die Differenz zwischen Fit und Messdaten ein Minimum erreicht (Methode der kleinsten Quadrate). Die berechnete Nullpunktverschiebung (in nm) wird im Feld *Zero shift* angegeben.

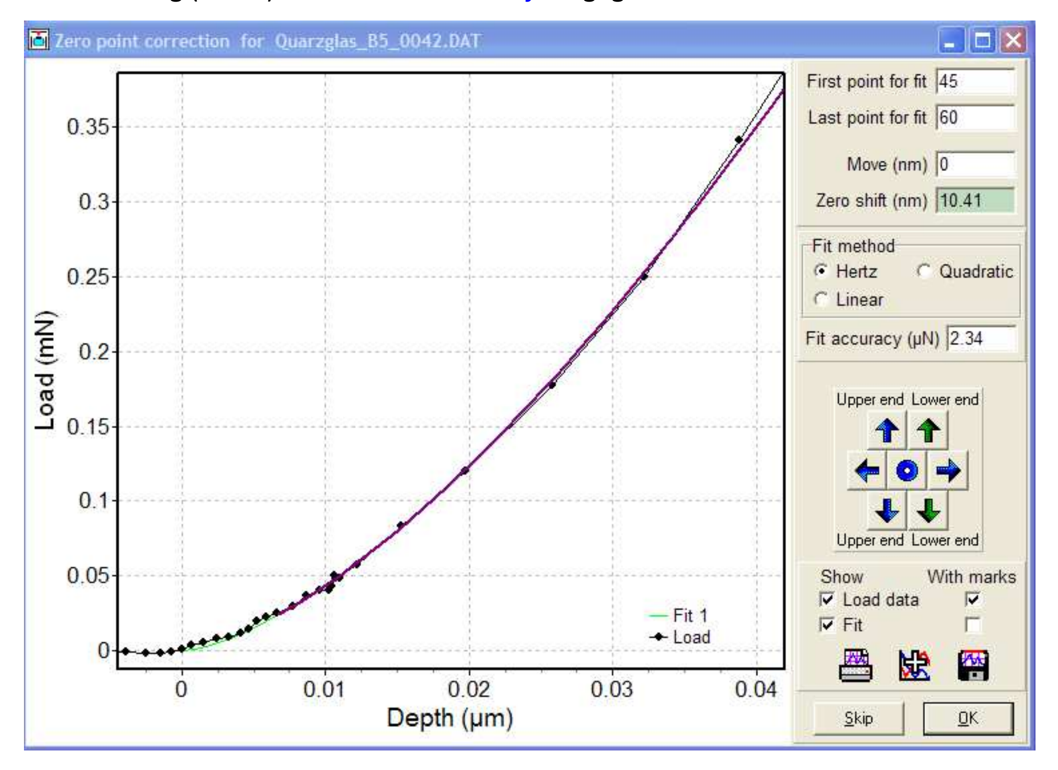


Abb. 47: Das Fenster Nullpunktkorrektur

Die lila Kurve zeigt das Fitergebnis für den Tiefenbereich, der für den Fit verwendet wurde. Der Standardbereich wird in der Konfiguration auf der Seite **Analysis normal** im Feld *Default depth range for back extrapolation* definiert. Normalerweise liegt dieser zwischen 20nm und 50nm.

Die grüne Kurve zeigt die Extrapolation der gefitteten Kurve auf die Kraft Null.

Normalerweise erlaubt eine rein visuelle Betrachtung der eingezeichneten grünen Kurve für die Nullpunktkorrektur eine Beurteilung, ob der gewählte Fit ausreichend ist oder nicht. Ein numerischer Wert für die Güte des Fits wird im Feld *Fit accuracy (µN)* (Fitgenauigkeit) angegeben. Der Wert gibt die mittlere Kraftdifferenz zwischen der Fitkurve und den Datenpunkten wieder und sollte einen Minimalwert annehmen.

Manuelle Korrekturen können durch Anklicken der blauen und grünen Pfeilschaltflächen vorgenommen werden. Die horizontalen Pfeilschaltflächen (oder die Pfeiltasten auf der Tastatur) verschieben die Kurve nach links oder rechts. Die insgesamt vorgenommene Verschiebung wird im Feld *Move* angezeigt. Anschließend wird der Fit wieder vorgenommen und h_0 bestimmt. Wenn der beste Fit bereits erreicht ist, hat die Bewegung nach links oder rechts keinen anderen Effekt als den Ausschluss von Datenpunkten aus dem Fitbereich. Das Ergebnis der Nullpunktverschiebung ändert sich in diesem Fall nicht, sondern tritt nur für sehr große Bewegungen > 500nm auf.

Die vertikalen Pfeilschaltflächen (oder die Pfeiltasten auf der Tastatur) erhöhen oder verringern die Anzahl der Datenpunkte für den Fit am oberen Bereich der Kurve. Die ersten und letzten Punkte für den Fit sind in den Feldern in der rechten oberen Fensterecke angegeben. Der erste Punkt wird normalerweise der Punkt 51 sein, falls Daten der Oberflächenfindung (Approach) vorliegen.

Die blauen Pfeilschaltflächen modifizieren die Punktzahl für das obere Ende des Fitbereiches.

Die grünen Pfeilschaltflächen modifizieren die Punktzahl für das untere Ende des Fitbereiches.

Die Schaltfläche ***Back*** mit dem blauen Kreis stellt den Originalzustand des Fits, falls möglich, wieder her (nicht in jedem Schritt verfügbar).

Klicken Sie auf die Schaltfläche ***OK***, um die Nullpunktkorrektur durchzuführen oder auf **Cancel**, um die Ergebnisse zu verwerfen.

4.4 Korrektur der thermischen Drift

Für die Korrektur der thermischen Drift verwendet man eine Haltezeit bei konstanter Kraft, weshalb weggesteuerte Messungen für diese Korrektur nicht geeignet sind. Es wird empfohlen, eine Haltezeit bei relativ kleiner Kraft im Verhältnis zur vorausgegangenen Maximallkraft zu verwenden um Kriechen zu vermeiden. Für den Fall, dass die Kraft während der Haltezeit nicht mindestens 10% kleiner ist als die vorherige Maximalkraft, wird die Haltezeit für die Korrektur der thermischen Drift nicht akzeptiert. Es ist auch möglich, während einer Messung mehrere Haltezeiten zu verwenden und zu analysieren.

Eine Haltezeit bei Maximalkraft ist immer verbunden mit Kriechen (plastischem Fließen), falls plastische Deformation stattfindet, und sollte für die Korrektur der thermischen Drift nur verwendet werden, wenn die Messung vollkommen elastisch war. Sie können die Verwendung eines Kriechsegments für die Korrektur der thermischen Drift im Konfigurationsfenster erlauben.

Wurde die manuelle Korrektur gewählt, öffnet sich das Fenster **Thermal drift correction** nach dem Drücken der Schaltflächen ***Analyse*** oder ***Start correction***. Bei der automatischen Korrektur ist das Fenster nicht sichtbar.

Im Fenster **Thermal drift correction** werden die Verschiebungsdaten über der Zeit innerhalb der Haltezeit und ein linearer Fit angezeigt. Der lineare Fit wird zur Ermittlung der Driftrate (in nm/s) verwendet. Der Beginn des linearen Fitbereichs wird als Prozentzahl der maximalen Haltezeit definiert. Der Fitbereich endet immer bei der Maximalzeit t_{max} der Haltezeit. Es wird empfohlen, bei 25% oder mehr von t_{max} zu beginnen, um Relaxationseffekte des Materials auszuschließen sowie Haltezeiten von 60s oder mehr zu verwenden.

Fit start und **Fit end** in Prozent der Haltezeit können unter Verwendung der Felder in der oberen rechten Ecke des Fensters in 1%-Schritten geändert werden. Die Pfeilschaltflächen erhöhen oder zu verringern den Wert Fit start in 5%-Schritten.

Das Feld ***Drift rate*** gibt das Ergebnis des linearen Fits in Nanometer pro Sekunde an.

Es wird angenommen, dass eine Änderung der thermischen Drift infolge Erwärmung oder Abkühlung des Gerätes gering ist. Wenn mehrere aufeinanderfolgende Messungen analysieren werden, kann eine Änderung der Driftrate von einer Messung zur anderen meist vernachlässigt werden. Das Programm merkt sich die mittlere Driftrate aller analysierten Messungen nach dem Programmstart. Die Genauigkeit der Driftkorrektur kann verbessern werden, wenn die mittlere Rate aus mehreren Messungen verwendet wird. Diese wird im Feld *Average rate* angegeben. Wenn die mittlere Rate für die Korrektur verwenden werden soll, ist das Kontrollkästchen **Use average rate** unterhalb des Feldes zu markieren. Die Schaltfläche ***Reset*** setzt die mittlere Driftrate auf Null zurück.

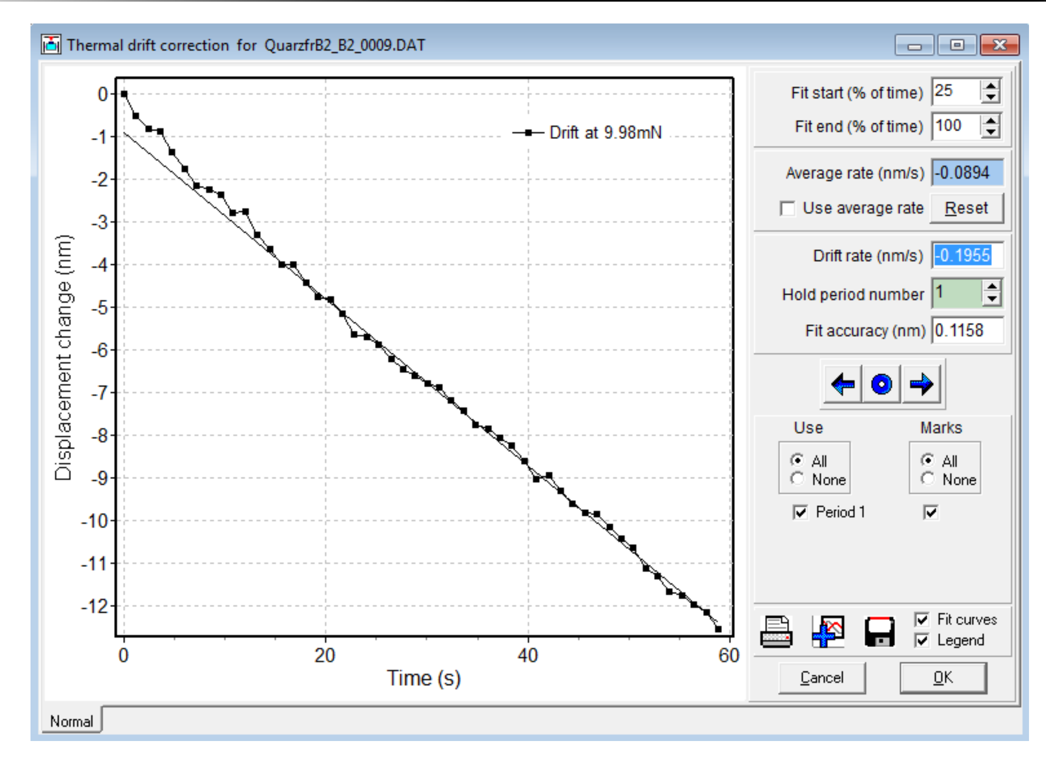


Abb. 48: Das Fenster Thermische Drift-Korrektur

Als Maß für die Güte des Fits dient die Größe **Fit accuracy (nm)**, die minimal sein sollte. Sie gibt die mittlere Abweichung der Daten vom linearen Fit an.

OK wendet die thermische Driftkorrektur auf alle Daten an.

Cancel verwirft die Änderungen.

Nach dem erstmaligen Drücken der Schaltfläche ***OK*** ändert sich das Fenster und die korrigierte Last-Verschiebungs-Kurve wird angezeigt. In diesem Fenster kann die Korrektur der thermischen Drift **per Hand** mit den Pfeilschaltflächen oder den Pfeiltasten der Tastatur verändert werden. Jeder Klick ändert die Driftrate um einen bestimmten Betrag (normalerweise 0.005nm/s). Die Schrittweite für die Driftänderung kann durch Anklicken einer der Pfeilschaltflächen mit der rechten Maustaste modifiziert werden. Die Einstellung einer Driftrate kann beispielsweise bei vollständig elastischen Messungen verwendet werden, wo Be- und Entlastungskurve übereinstimmen sollten. Man kann sich dadurch eine Haltezeit einsparen.

Die Schaltfläche ***Back*** setzt die Korrektur der thermischen Drift auf Null.

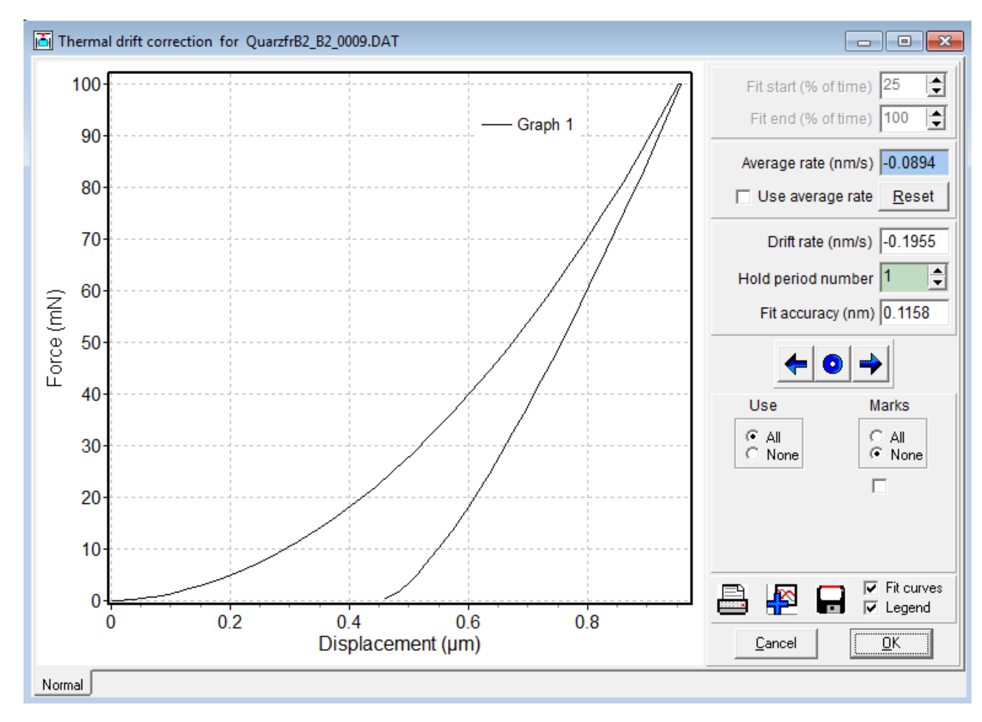


Abb. 49: Das Fenster Thermische Drift-Korrektur nach dem ersten mal Drücken von OK

4.5 Mitteln von Messkurven

Wenn mehrere DAT-Files gleichzeitig eingelesen werden, öffnen sich zwei Fenster: **Data overview** und **File selection for analysis**. Im Data overview Fenster werden alle eingelesenen Messkurven angezeigt. Rechts erscheinen so viele Auswahlfelder, wie Kurven. Hier kann man durch Entfernen der Häkchen einzelne Kurven von der Auswertung ausschließen. Dies ist zu empfehlen, wenn Kurven deutlich von den anderen abweichen.

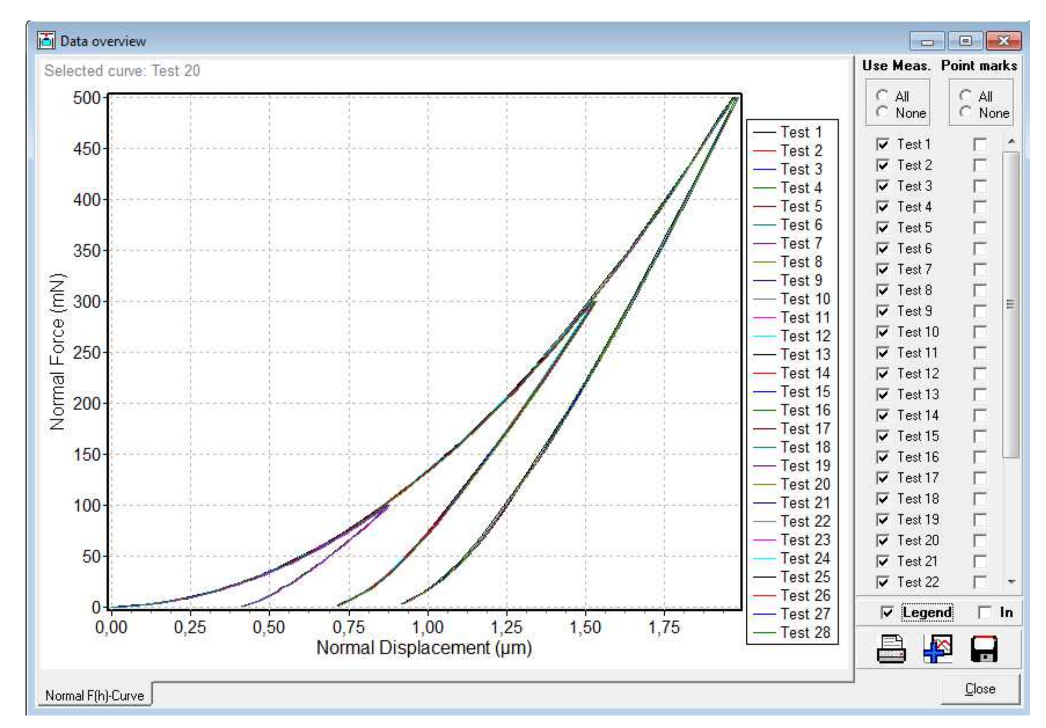


Abb. 50: Das Fenster Data overwiew

Um bei einer Vielzahl von Kurven herauszufinden, um welche Kurvennummer es sich handelt, reicht es mit der Maus genau auf die Kurve zu klicken (eventuell muss vorher ein Teil herausgezoomt werden). Die Kurvennummer wird oben links im *Data overview* Fenster angezeigt.

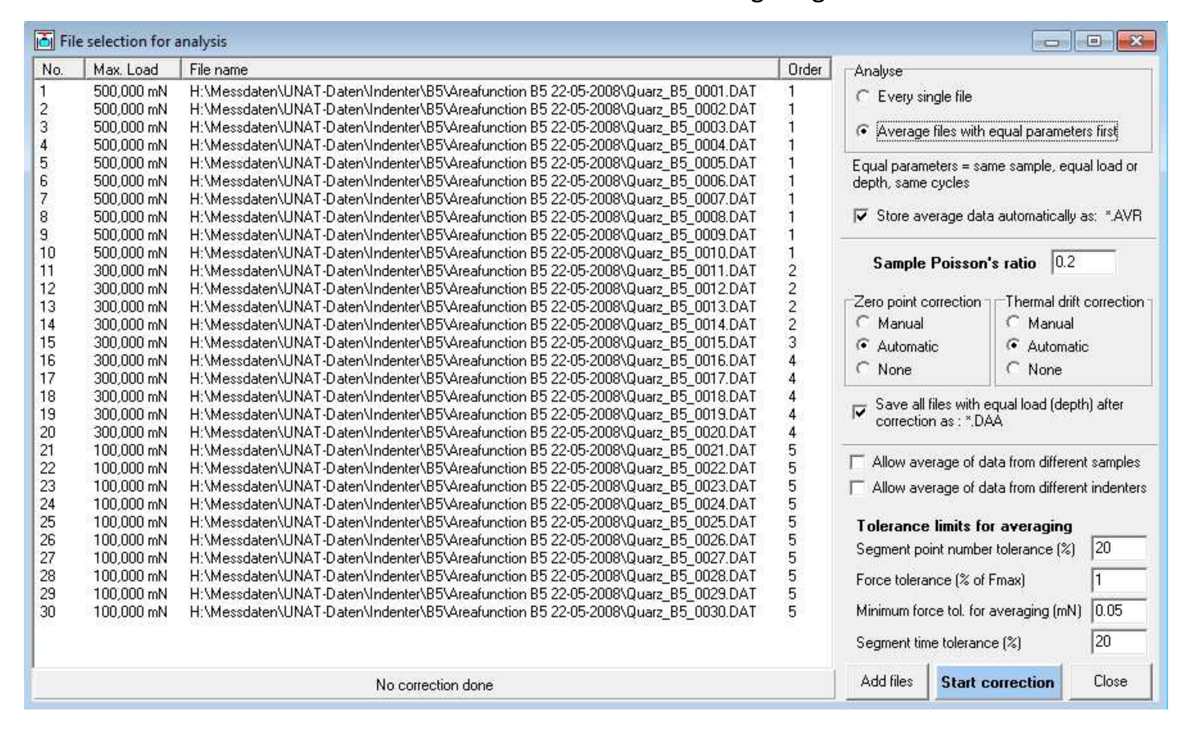


Abb. 51: Das File selection Fenster mit den Optionen für das Mitteln von Kurven

Im File Selection Fenster wird im Feld **Analyse** festgelegt,

- ob alle Kurven einzeln ausgewertet werden – *Every single file*
- oder ob erst aus allen gleichen Messungen Mittelwertkurven erzeugt werden und nur die gemittelten Kurven ausgewertet werden – Average files with equal parameters first

Store average data automatically as *.AVR: legt fest, dass für jede gemittelte Kurve ein neues Datenfile mit der Endung AVR (für Average) gespeichert wird (Standardeinstellung). Dies hat den Vorteil, dass man Korrektur und Mittelung nicht wiederholen muss, wenn man die Daten noch einmal auswertet.

In diesem Fenster wird außerdem festgelegt, ob und wie Korrekturen durchgeführt werden. Sowohl für die Nullpunktkorrektur (*Zero point correction*, s. Abschnitt 4.3) als auch für die Korrektur der thermischen Drift (*Thermal drift correction*, s. Abschnitt 4.4) kann gewählt zwischen

- Manueller Korrektur
- Automatischer Korrektur
- Keiner Korrektur

Standardmäßig wird die Korrekturmethode verwendet, die im Konfigurationsfenster festgelegt wurde, jedoch kann sie hier geändert werden. Es wird empfohlen die automatische Korrektur zu verwenden. Nur wenn ein Warnhinweis zur Korrektur im Statusfenster erscheint, sollte man mit Hilfe der manuellen Korrektur nach der Ursache suchen.

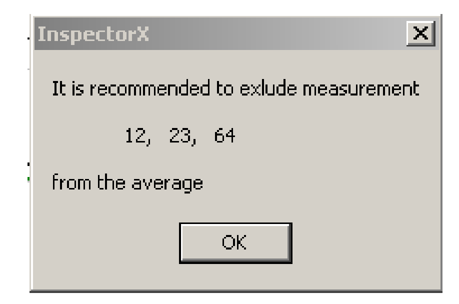
Die Korrektur wird mit **Start correction** [Start correction] gestartet. Wenn die Korrektur durchgeführt wurde, ändert sich diese Schaltfläche in [Start analysis] **Start Analysis** und die Farbe der Schaltfläche ändert sich. Nochmaliges Drücken der Schaltfläche bewirkt dann das Öffnen des *Average results* Fensters oder eines analogen Fensters zur Ergebnisanzeige.

Wurde bereits eine automatische Nullpunkt- oder Driftkorrektur durchgeführt bewirkt ein Drücken der manuellen Korrektur, dass die Korrekturen bei allen Datenfiles zurückgesetzt werden und die

Schaltfläche sich wieder in **Start correction** ändert. Das Gleiche passiert, wenn weitere Datenfiles hinzugefügt werden oder wenn weitere Kurven im Fenster *Data overview* angekreuzt werden.

Wenn die Auswertung erfolgreich war, erscheint im unteren linken Feld des Fensters die Meldung **AVR-Files saved – DAA-File(s) saved** sofern die Speicheroptionen angekreuzt wurden.

Bei der Mittelung von Messdaten wird geprüft, wie gut die Kurven übereinstimmen. Auf der Seite Analysis normal des Konfigurationsfenster wird im Bereich *Statistics* der *Acceptance range* für die Übereinstimmung festgelegt. Die ermittelte Standardabweichung der Maximaltiefen der Messungen wird mit diesem Faktor multipliziert. Wenn die Tiefe einzelner Kurven außerhalb dieses Bereichs um den Mittelwert der Tiefe liegt, wird empfohlen, diese Kurven von der Mittelung auszuschließen.



Der empfohlene Ausschluss von Messungen erfolgt im Fenster **Data overview**, indem das entsprechende Häkchen vor der Zahl der Messung automatisch entfernt wird, wenn man OK drückt. Im Beispiel werden die Messungen Nr. 12, 23 und 64 ausgeschlossen.

Sample Poisson's ratio: Für die Berechnung des E-Moduls aus Härtemessungen ist die Poissonzahl erforderlich. Wenn sie nicht bekannt ist, kann sie abgeschätzt werden oder aus der von ASMEC verfügbaren Datenbank entnommen werden (separates Modul). Der hier eingegebene Wert wird für alle Datenfiles übernommen. Wenn man Daten von verschiedenen Materialien zusammen auswertet, ist später eventuell die Poissonzahl zu korrigieren.

Save all files with equal load (depth) after correction as .DAA: legt fest, dass für jede gemittelte Kurve ein neues Datenfile mit der Endung DAA (für all data) gespeichert wird (Standardeinstellung). Dieses File enthält alle Kurven aus denen ein Mittelwert gebildet wird nach der Korrektur. Dies hat den Vorteil, dass man die Korrektur nicht wiederholen muss, wenn man die Daten noch einmal auswertet und trotzdem später entscheiden kann, alle Messungen einzeln auszuwerten statt sie zu mitteln.

Allow average of data from different samples: Manchmal werden Messungen wiederholt und man vergisst die korrekte Probenbezeichnung einzustellen. Standardmäßig werden solche Messungen nicht als gleich akzeptiert. Wenn man das Häkchen hier setzt, kann man auch Datenfiles mitteln in denen verschiedene Probenbezeichnungen gespeichert sind.

Allow average of data from different indenters: Das gleiche kann auch bei der Indenterbezeichnung passieren. Wenn man vergisst vor der Messung das richtige Konfigurationsfile einzulesen, wird ein falscher Wert im Datenfile gespeichert und das Mitteln von Messungen, in denen ein anderer Indenter vermerkt ist, wird abgelehnt. Dies kann durch Setzen des Häkchens verhindert werden.

Tolerance limits for averaging

Der untere Bereich des Fensters enthält Kriterien, welche Messungen als gleich akzeptiert werden. Die relativen Limits (in %) für die Kraft, die Zahl der Punkt in einem Segment, und die Messzeit eines Segments werden geprüft. Es ist zu beachten, dass die Limits für jedes Segment eingehalten werden müssen. Wenn beispielsweise eine Kriechzeit nur 2s dauert, wäre eine Zeit von 2,11s bereits außerhalb des Limits von 10%. Die Limits sind vor allem für das Mitteln von Messungen im *open loop* Mode von Bedeutung, da im *closed loop* Mode alle Segmente normalerweise besser als 1% übereinstimmen.

Add files: Mit Add files können vor dem Start der Auswertung weitere Datenfiles zur Liste hinzugefügt werden.

5 Analyse der Messdaten

5.1 Auswertung von Härte- und E-Modul-Messungen

Die Auswertung wird im Fenster **Average results** vorgenommen. Dieses Fenster hat mehrere Seiten, die im Folgenden erläutert werden. Einige Funktionen sind für alle Seiten des Fensters gültig. Sie sind am rechten Rand des Fensters zu sehen.

Zur Bedeutung der Schaltflächen ***Print***, ***Add graph*** und ***Save*** siehe Kapitel 4.2.

Die komplette Seite einschließlich des Diagramms und der Ergebnisse kann unter Verwendung von ***Print*** im Hauptmenü ausgedruckt werden. Falls das Feld mit den Ergebnissen im Ausdruck leer bleibt, markieren Sie bitte das Kontrollkästchen *Black/white output in results window during printout* im Fenster *Configuration*, Seite Analysis normal.

Cycle: Bei Messungen mit mehreren Be- und Entlastungszyklen, kann die Auswertung für einen der Zyklen über dieses Auswahlfeld angezeigt werden. Bei nur einem Zyklus ist das Feld inaktiv.

Smoothing: Glättet alle sichtbaren Kurven auf der gerade sichtbaren Seite. Dafür ist der Button Smooth curve zu drücken. Die Glättung kann schrittweise in mehreren Stufen erfolgen. Bei jedem Drücken der Schaltfläche wird die Glättung verstärkt bis zur maximalen Stufe 10. Die aktuelle Stufe wird im Feld angezeigt. Mit **Reset** kann die Glättung wieder rückgängig gemacht werden.

Marks: Markiert die Lage eines Datenpunktes durch ein Symbol. Die Punkte werden durch eine durchgezogene Linie in den Zwischenräumen verbunden.

Fit marks: Markiert die Lage eines Datenpunktes einer Fitkurve (falls verfügbar) durch ein Symbol. Die Punkte werden durch eine durchgezogene Linie verbunden.

Die Schaltfläche **E-*Modulberechnung unter Verwendung rein elastischer Verformungen*** ist am rechten Rand sichtbar, wenn die Applikation *Elastic modulus measurements with spheres* für die Messung gewählt wurde. Beim Anklicken der Schaltfläche öffnet das Fenster **Elastic fit of load-displacement curve**. Dieses Fenster öffnet sich auch automatisch, wenn ein AVR-File dieser Applikation geöffnet wird.

5.1.1 Seite Load-Displacement

Das Fenster **Average results** wird geöffnet, wenn AVR-Dateien (Average data files) eingelesen werden oder wenn die Schaltfläche ***Analyse*** im Fenster **Measurement data** gedrückt wird und die gewählte Applikation für Härtetests geeignet ist.

Auf der Seite *Load-Displacement* sind die komplette Be- und Entlastungskurve sowie eine Fitkurce (rot) und die Tangente an die Entlastungskurve bei Maximalkraft (grün) dargestellt. Rechts werden die Ergebnisse für jene Parameter angezeigt, die in der Konfiguration ausgewählt wurden. Die Ergebnisse können mit der Maus markiert und in die Zwischenablage kopiert werden.

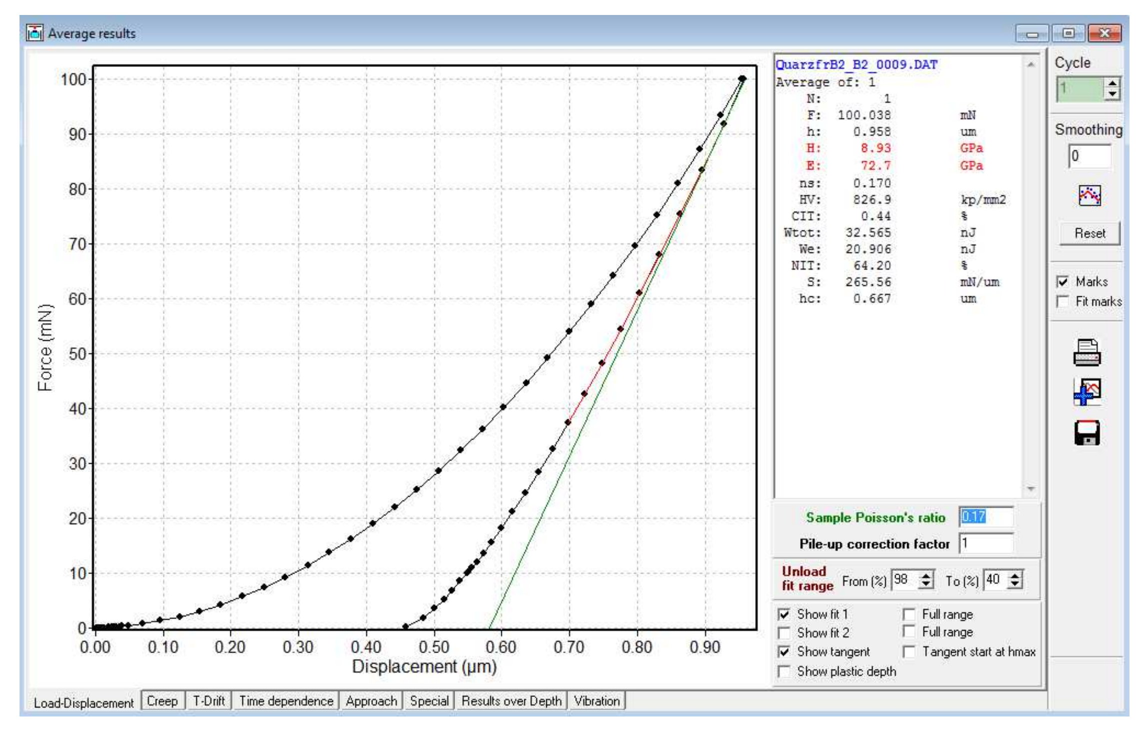


*Abb. 52: Die Seite **Load-Displacement** des Fensters **Average results***

In der Konfiguration wird festgelegt, welche Größen in welcher Farbe und mit wie viel Nachkommastellen angezeigt werden.

Unload fit range: Die Entlastungskurve wird mit zwei verschiedenen Funktionen zwischen einer oberen (*From*) und einer unteren (*To)* Kraftgrenze gefittet. Die Grenzen werden in Prozent der Maximalkraft angegeben. Die obere Grenze sollte zwischen 100% und 90% und die untere Grenze zwischen 80% und 20% liegen. Die Standardwerte sind 98% und 40%.

Show fit 1: Zeigt den Fit an die Entlastungskurve unter Verwendung eines Polynoms zweiten Grades (rote Kurve)

$$F = c_1 + c_2 \cdot h + c_3 \cdot h^2$$

Show fit 2: Zeigt den Fit an die Entlastungskurve unter Verwendung einer Potenzfunktion (grüne Kurve)

$$F = C \cdot (h - h_0)^m$$

Full range: Zeigt bei gesetztem Häkchen die Fitkurven über den gesamten Bereich zwischen 0 und 100% an. Damit kann geprüft werden, ob die Fitkurve der Messkurve auch außerhalb des Fitbereichs folgt. Dies ist von Bedeutung, wenn der Fit nicht bei 100% gestartet wurde, da der Anstieg der Fitkurve bei 100% für die Berechnung der Steifigkeit verwendet wird.

Show tangent: Zeigt die Tangente an die Entlastungskurve bei Maximalkraft. Der Anstieg stellt die Kontaktsteifigkeit S dar.

Tangent start at hmax: Normalerweise beginnt die Tangente zur Berechnung der Kontaktsteife am Punkt maximaler Last am Ende des Kriech-Segmentes. Wenn das Material jedoch bei Beginn der Entlastung noch signifikant kriecht, kann es genauer sein, wenn die Tangente an den Punkt maximaler Tiefe hmax bei einer etwas geringeren Kraft angelegt wird. In diesem Fall ist der Haken in dieses Feld zu setzen. Das beeinflusst nicht das Ergebnis für die Steifigkeit (den Anstieg der Tangente) sondern nur die Berechnung der Kontakttiefe und damit der Fläche. Die nächsten Abbildungen zeigen ein Beispiel.

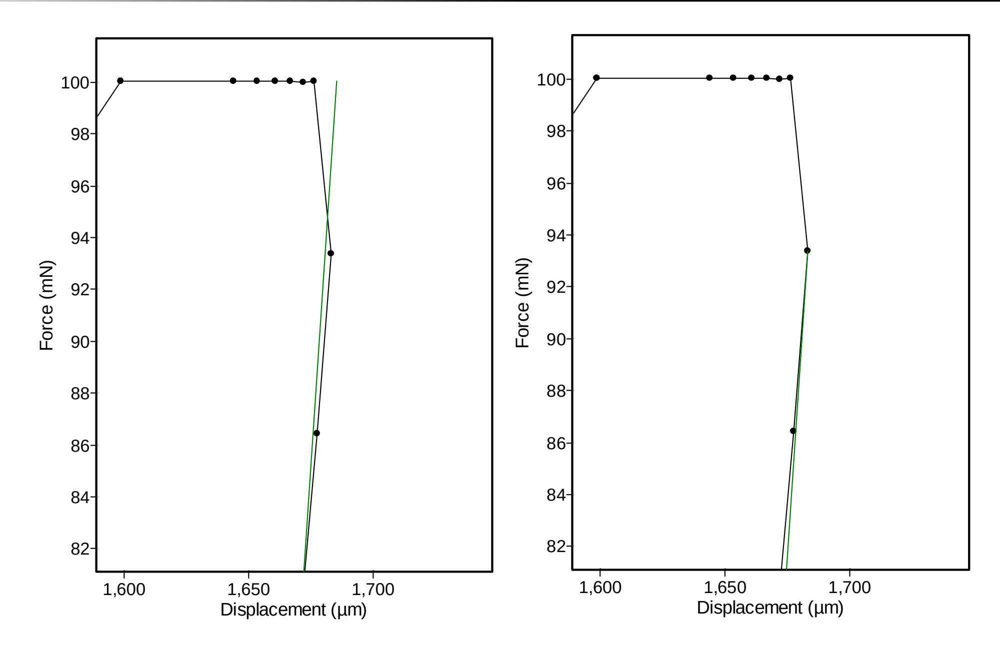


Abb. 53: Position der Tangente an die Entlastungskurve, links beim automatischen Fit zwischen 98% und 40%; rechts bei Verwendung von Tangent start at hmax

Show error band: Das Fehlerband zeigt den Fehler der Eindringtiefe für jeden Datenpunkt als ± 1x Standardabweichung

Show plastic depth: Zeigt die Kurve Kraft-Eindringtiefe nach Abzug des elastischen Teils der Verformung, so dass nur die plastische Verformung übrig bleibt.

Sample Poisson's ratio: Die Poissonzahl ist notwendig, um den Eindringmodul der Probe aus dem reduzierten E-Modul zu berechnen, der auch die Indenterverformung beinhaltet. Nur der reduzierte E-Modul lässt sich direkt messen. Die folgenden Werte können verwendet werden, wenn die tatsächliche Poissonzahl nicht bekannt ist:

Stahl, Nickel, Eisen: 0.3
Die meisten Metalle: 0.35
Gold, Blei, Palladium, Platin: 0.4
Gläser: 0.2
Keramik und Hartschichten: 0.25
DLC (diamantähnlicher Kohlenstoff) 0.2
Polymere: 0.4
Holz: 0.3

Die Änderung der Poissonzahl bewirkt sofort eine Neuberechnung der Ergebnisse. Die Poissonzahl, die in der Analyse verwendet wurde, wird in der AVR-Datei abgespeichert, so dass sie wiederhergestellt wird, wenn die Datei wieder geöffnet wird.

Pile-up correction factor: Korrektur zur Berücksichtigung des Pile-up-Effektes, d.h. des Auftretens plastischer Verformung des Materials (Aufwölbungen) an den Rändern des Eindrucks, die zu einer Verschiebung der Oberflächenposition führt. Ein Wert größer als 1 bedeutet, dass die Kontaktfläche größer ist als sich aus der ersten Berechnung ergibt (pile up) und ein Wert kleiner als 1 bedeutet ein Einsinken an den Rändern. Die Größe des Pile-up-Effektes kann nicht allein aus der Eindringkurve bestimmt werden. Man benötigt eine zusätzliche Messung des Profils zum Beispiel mit AFM oder optischem Profilometer.

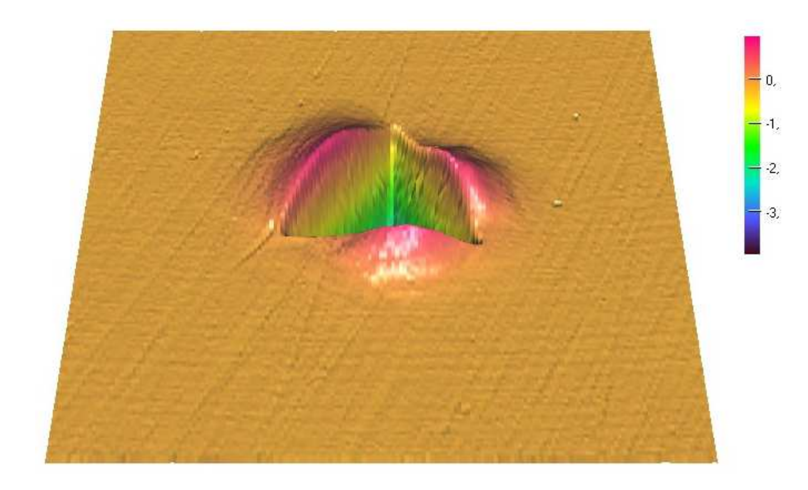


Abb. 54: Beispiel für den pile-up Effekt in Kupfer

5.1.2 Seite Creep

Die Seite zeigt eine oder mehrere Kriechkurven während einer Haltezeit der Kraft bei einem lokalen Kraftmaximum (nach Korrektur der thermischen Drift). Kriechen bedeutet eine Tiefenänderung über die Zeit bei konstanter Kraft.

Die Kurve wird mit zwei unterschiedlichen Funktionen gefittet:

Logarithmische Funktion: $\Delta h = A \cdot \ln(B \cdot t + 1)$ t - Zeit

Polynomfunktion: $\Delta h = c_1 \cdot t + c_2 \cdot t^{1/2} + c_3 \cdot t^{1/4} + c_4 \cdot t^{1/8}$ h – Tiefe

Die Funktion 1 wird für die Berechnung der empfohlenen Haltezeit verwendet. Die Funktion 2 hat mehr Parameter und kann deshalb besser den Daten folgen. Sie wird für die Berechnung der Kriechrate am Ende der Messung verwendet.

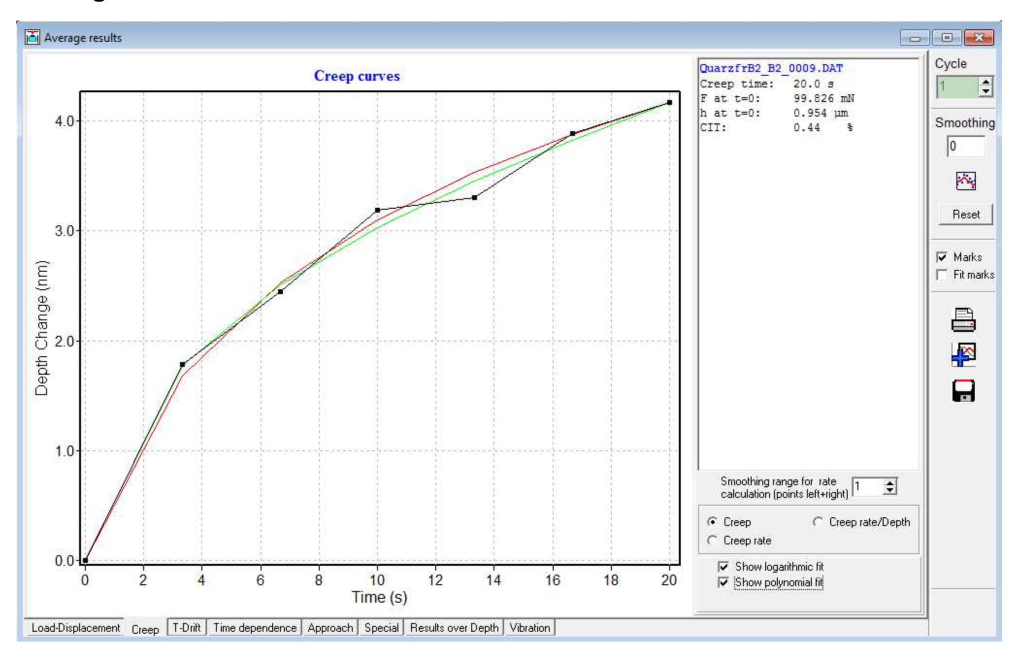


*Abb. 55: Die Seite **Creep** des Fensters **Average results***

Es können 3 unterschiedliche Diagrammarten ausgewählt werden:

- **Creep**: Darstellung der Tiefenänderung über der Zeit für konstante Kraft

- **Creep rate**: Darstellung der Kriechrate über der Zeit
- **Creep rate/Depth**: Darstellung des Quotienten aus Kriechrate und Eindringtiefe über der Zeit. Das Ergebnis sollte bei homogenen Materialien annähernd lastunabhängig sein.

Im rechten Teil des Fensters sind die Ergebnisse für die Analyse der Kriechkurve dargestellt. Es werden nur diejenigen Parameter angezeigt, die man in der Konfiguration ausgewählt hat und die zur Kriechanalyse gehören.

Mit **Smoothing range for rate calculation** kann festgelegt werden, wie viel benachbarte Punkte für die Berechnung des Anstiegs an einem Punkt verwendet werden. Eine größere Punktzahl bedeutet eine größere Glättung.

Die Kriechrate wird immer ermittelt, wenn unter Kraftsteuerung eine Haltezeit von mindestens 1s verwendet wird und mindestens 4 Messpunkte vorhanden sind. Die Kriechzeit sollte jedoch nicht unter 5s liegen und ist an das Kriechverhalten der Materialien anzupassen.

Aus der Kriechrate **Rc** am Ende der Kriechzeit und der Entlastungsrate **Rul** in den ersten 20% der Entlastung wird ein Verhältnis **Rul/Rc berechnet, dass größer 20 sein sollte**. Andernfalls kann das noch vorhandene Kriechen während der Entlastung zu einer Verfälschung des Anstiegs der Entlastungskurve und damit zu einem ungenauen E-Modul führen.

Das Verhältnis **Rul/Rc** wird bei der Auswertung geprüft. Wenn der Wert kleiner 20 ist, wird eine Warnmeldung im Statusfenster ausgegeben. In diesem Fall sollte man sich das Ergebnis noch einmal kritisch anschauen. Es ist jedoch nicht unbedingt notwendig die Ergebnisse zu verwerfen. ***Bei weiteren Messungen am gleichen Material sollte die Kriechzeit verlängert werden.***

5.1.3 Seite T-Drift

Auf dieser Seite wird die Wegänderung während der Haltezeit zur Bestimmung der thermischen Drift **nach** der Korrektur der thermischen Drift angezeigt. Im Idealfall sollte dies eine waagerechte Linie bei Null sein. Tatsächlich zeigt die Kurve an, wie viel Materialeinfluss in den ersten Sekunden der Haltezeit noch existierte und wie schnell er abklingt. Im Beispiel von Quarzglas in Abb. 56 beträgt die Änderung nur etwa 1,2 nm und zeigt die hohe Auflösung der Wegmessung des Gerätes.

Wenn keine Driftkorrektur vorgenommen wurde, zeigt die Kurve das tatsächliche Driftverhalten.

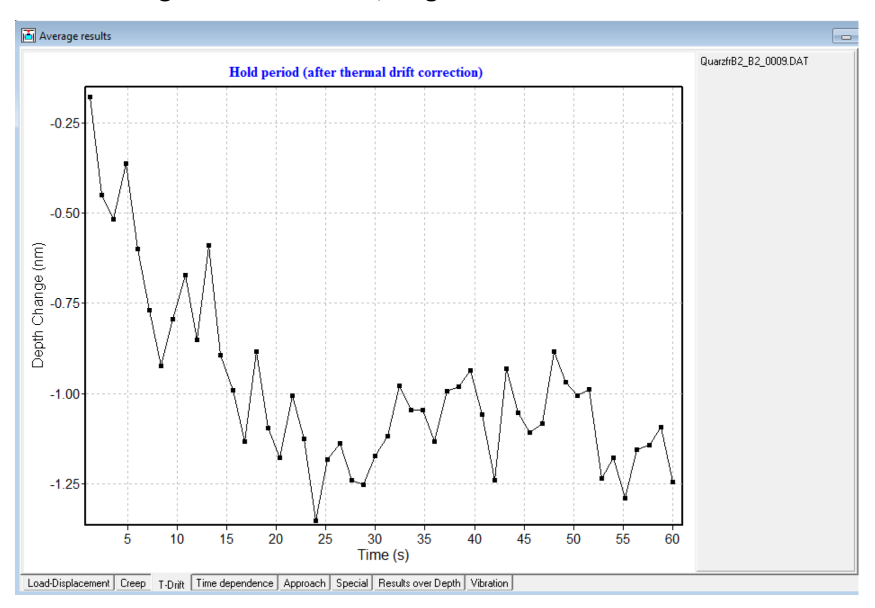


*Abb. 56: Die Seite **T-Drift** des Fensters **Average results***

5.1.4 Seite Time dependence

Auf dieser Seite werden alle Daten als Funktion der Zeit dargestellt. Neben Kraft und Verschiebung können das auch die Kontaktsteifigkeit (aus CSM- oder QCSM-Messungen) oder, falls verfügbar, zusätzliche Kanäle sein, z.B. der Kontaktwiderstand zwischen Indenterspitze und Probe.

Das Kraftsignal (schwarze Kurve) kann dargestellt werden als:

- **Force over time** (Kraft über der Zeit)
- **Loading rate** (Belastungsrate).

Das Signal der Eindringtiefe (rote Kurve) kann dargestellt werden als:

- **Displacement over time** (Verschiebung/Eindringtiefe über der Zeit)
- **Displacement rate** (Deformations- oder Verschiebungsrate)
- **Strain rate** (Dehnungsrate) als Verschiebungsrate dividiert durch die Verschiebung.

Die Kurven für die Belastungsrate oder die Verschiebungsrate können eine größere Streuung aufweisen und die Rate kann daher nicht gut erkannt werden. In diesem Fall kann eine Glättung durchgeführt werden durch Erhöhung der Anzahl benachbarter Punkte für die Ratenberechnung unter Verwendung des Feldes **Smoothing range**.

Alle Signale werden auf der linken Achse des Diagramms dargestellt. Abhängig von ihrer Maßeinheit werden sie sehr unterschiedliche Maximalzahlen (z.B. 1µm für die Tiefe und 500mN für die Kraft) aufweisen und der Kurvenverlauf kann nicht klar erkannt werden. Aus diesem Grunde können die Kurven durch Drücken der Schaltfläche ***Auto scale*** automatisch oder per Hand unter Verwendung eines Faktors in den **Factor**-Feldern skaliert werden.

Alle Kurven werden dann so skaliert, dass sie dasselbe Maximum aufweisen. Der daraus folgende Skalierungsfaktor ist in den Feldern *Factor* und in der Diagrammlegende ablesbar. Das Skalieren kann durch Entfernen des Häkchens in den Kästchen **Scale** verhindert werden.

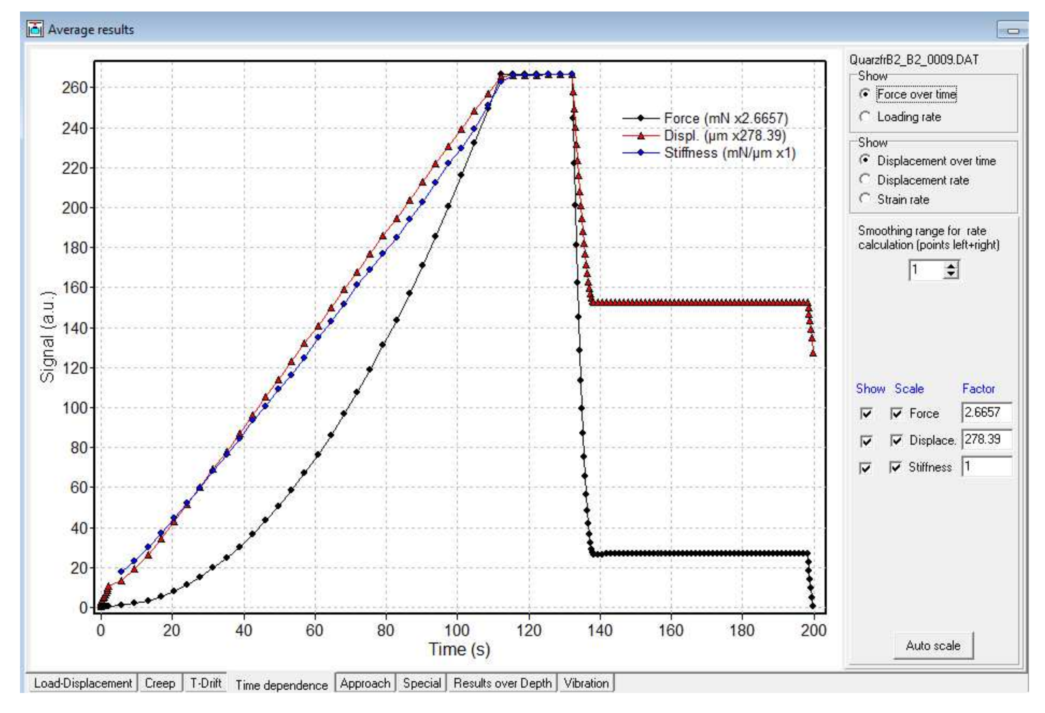


*Abb. 57: Die Seite **Time-Dependence** des Fensters **Average results***

5.1.5 Seite Approach

Die Approach Seite zeigt Daten von der Annäherung des Indenters an die Oberfläche bevor es zum Kontakt kommt. Sie erlaubt es die Stabilität und das Rauschen des Kraft- und Wegsignals zu prüfen. Es ist zu beachten, dass das dargestellte Rauschen beim Mitteln mehrerer Datenfiles reduziert wird. Daher eignet sich dieses Fenster auch nicht zur Bestimmung der *Contact force for Piezo* (Kapitel 4.2).

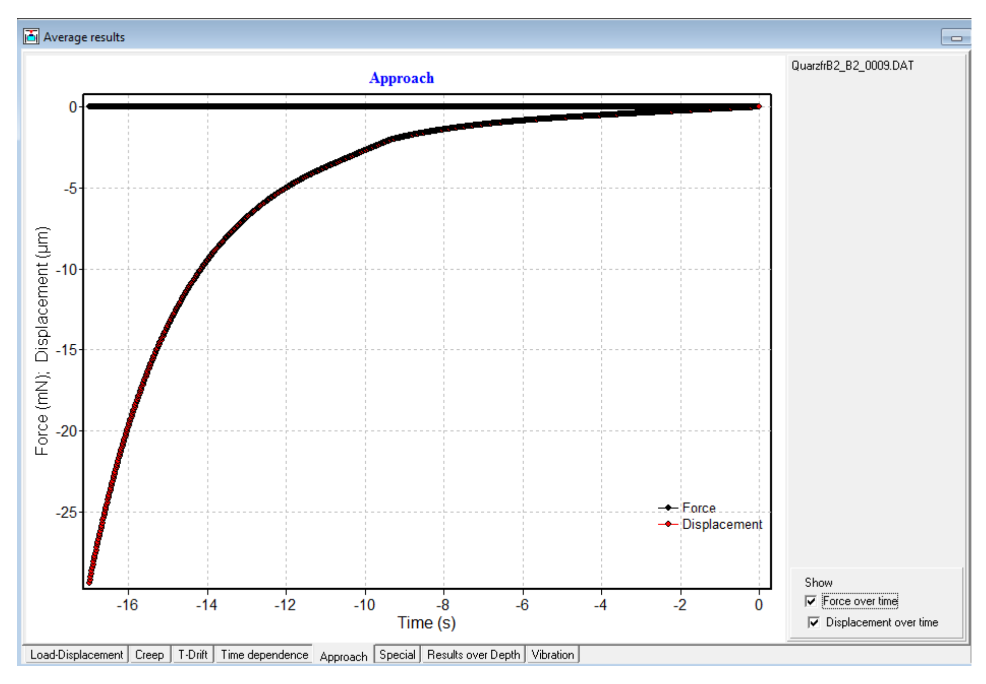


*Abb. 58: Die Seite **Approach** des Fensters **Average results***

5.1.6 Seite Special

Auf der Seite *Special* können die Be- und Entlastungskurve in einer Vielzahl von Variationen dargestellt werden, um verschiedene Modellansätze bzw. Fitprozeduren zu erproben. Die Größen für die X-Achse bzw. Y-Achse können rechts von der Grafik ausgewählt werden:

- Time: Zeit
- Displacement: Verschiebung/Eindringtiefe
- Force: Kraft
- ln (Displacement): natürlicher Logarithmus der Verschiebung
- ln (Force): natürlicher Logarithmus der Kraft
- Root (Displacement): Quadratwurzel aus der Verschiebung
- Displacement^3/2: Verschiebung mit der Potenz 3/2
- Displacement^2: Verschiebung zum Quadrat
- Root (Force): Quadratwurzel aus der Kraft
- Force^2/3: Kraft mit der Potenz 2/3
- Force^2: Kraft zum Quadrat
- 1. Derivative (F(h)): 1. Ableitung der Kraft-Verschiebungs-Kurve
- 2. Derivative (F(h)): 2. Ableitung der Kraft-Verschiebungs-Kurve
- Local Exponent f(h): Lokaler Exponent

Das Zeichen ^ bedeutet „Potenz von“

Die Be- und Entlastungskurven werden separat betrachtet. Die obere Achse (in Rot) gehört zur Entlastungskurve (ebenfalls in Rot). Gleicher Maßstab für die obere und untere Achse kann erreicht werden such Ankreuzen des Feldes **Equal scale top + bottom**.

Beide Kurven können mit einer linearen Funktion oder mit Polynomen zweiter und dritter Ordnung gefittet werden. Die Fitfunktion wird in der Auswahlliste (Drop-down) ausgewählt. Die Fitergebnisse werden im Ergebnisfeld rechts oben angezeigt und können kopiert werden, indem man die Zeilen markiert und in die Zwischenablage übernimmt (Strg+Einfg oder Strg+C).

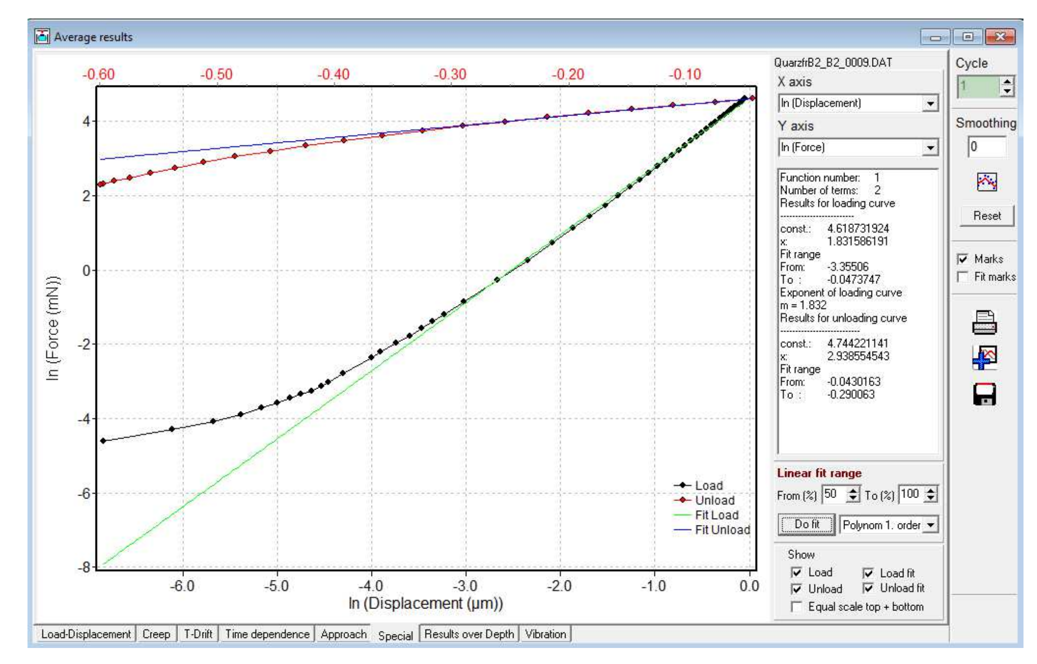


*Abb. 59: Die Seite **Special** des Fensters **Average results***

Linear fit range: Beginn und Ende des Fitbereichs in Prozent der X-Achse

Do fit: Startet den Fit für den ausgewählten Bereich. Die Kurve wird auch in den Bereich außerhalb des gewählten Fitbereichs extrapoliert.

Im gewählten Beispiel werden die 2 Fitgeraden für einen linearen Fit über die letzten 50% der Belastungs- und Entlastungskurve in logarithmischer Darstellung gezeigt. Das erlaubt die Berechnung des Exponenten der Belastungskurve, der im Ergebnisfeld als m=1,832 angezeigt wird.

5.1.7 Seite Results over Depth

Auf der Seite *Results over Depth* kann die Abhängigkeit verschiedener Größen von der Eindringtiefe dargestellt werden. Für eine normale Härtemessung mit nur einem Entlastungszyklus steht nur die Auswahl

Depth dependent hardness zur Verfügung. Dies erlaubt die Berechnung der

- Martens hardness
- Estimated indentation hardness (geschätzte Eindruckhärte)
- Differential Martens hardness

Bei Estimated indentation hardness wird ein tiefenunabhängiger E-Modul angenommen und der elastische Anteil der Deformation abgezogen. Dies entspricht der früheren Definition der Plastischen Härte HU_{pl} oder der Eindringhärte.

Wenn mehr als ein Entlastungszyklus gemessen wurde (Zyklische Messungen) oder wenn tiefenabhängige Werte der Kontaktsteifigkeit vorliegen (z.B. bei Nutzung der QCSM/CSM Option während der Messung) steht auch die Auswahl

Depth dependent results (Tiefenabhängige Ergebnisse) zur Verfügung. Die Größe, die dargestellt werden soll, kann im pull-down Menü rechts oben ausgewählt werden.

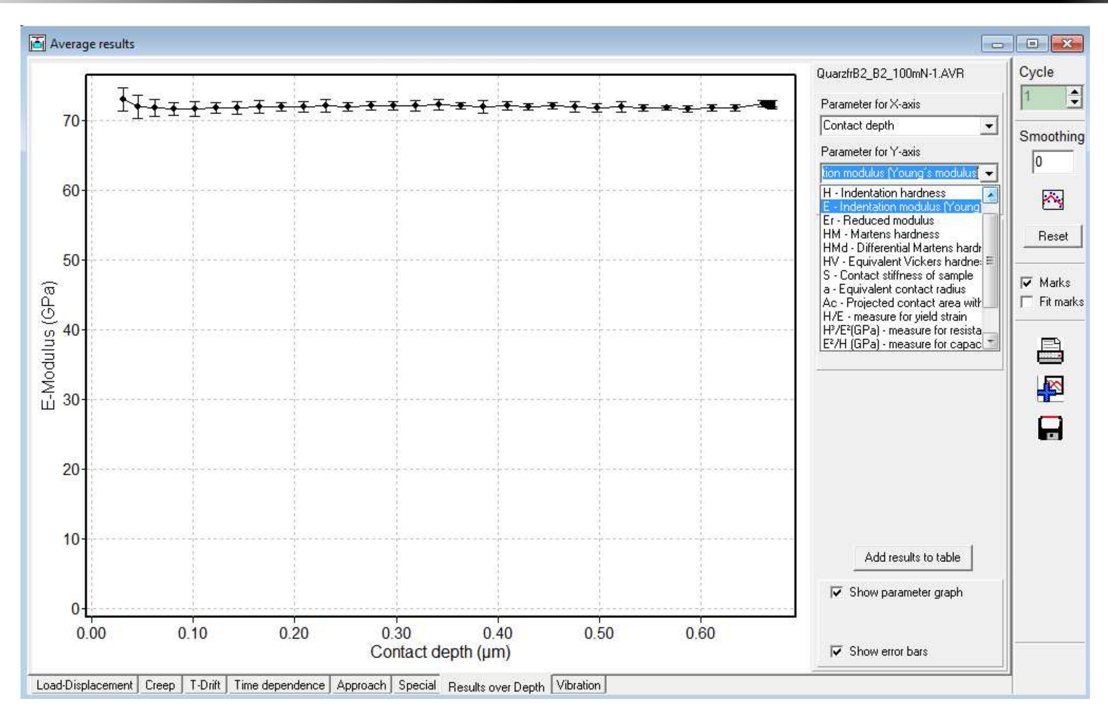


*Abb. 60: Die Seite **Results over Depth** des Fensters **Average results** mit dem Ergebnis einer QCSM Messung an Quarzglas*

Die Schaltfläche ***Read reference*** erlaubt es ein Referenz-Datenfile (AVR-File) zu lesen und ein Härteverhältnis oder eine Härtedifferenz zu den Daten dieses Files zu berechnen. Für weitere Informationen siehe Kapitel 5.1.10.

5.1.8 Seite Vibration

Diese Seite gehört zur Auswertung von CSM/QCSM Messungen (nur UNAT). Hier werden die Amplituden und Phasen der Messsignale angezeigt, die in die Kontaktsteife und die Phasenverschiebung umgerechnet werden können. Siehe dazu Kapitel 5.4 Auswertung von QCSM Messungen

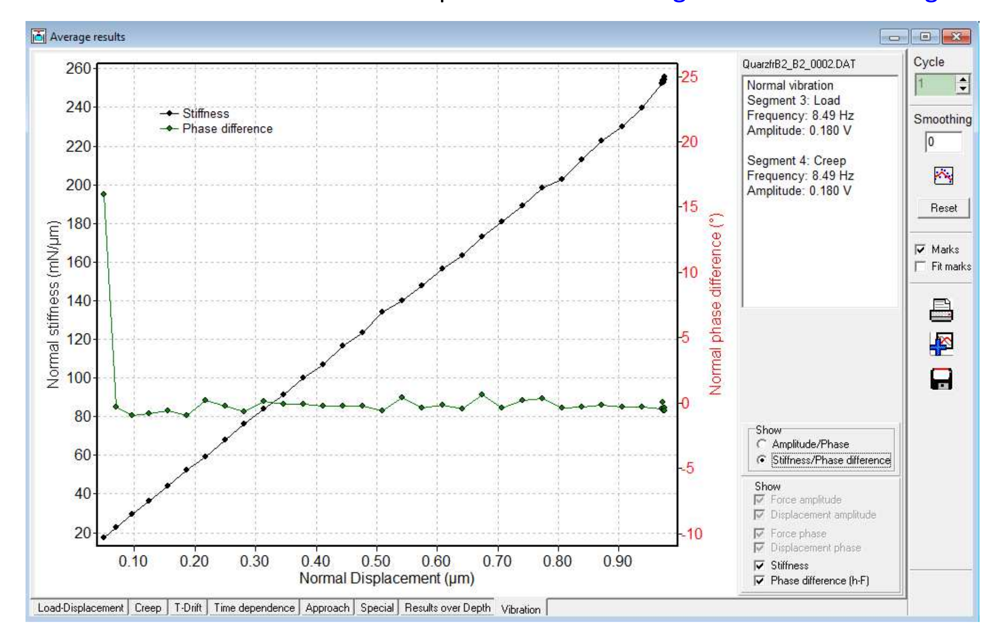


*Abb. 61: Die Seite **Vibration** des Fensters **Average results***

5.1.9 Extrapolation des Eindringmoduls auf Null Eindringtiefe

Diese Methode wird für dünne Schichten angewendet, bei denen es nicht möglich ist, die Schichteigenschaften ohne Substrateinfluss zu messen. Sie wird in der Norm DIN ISO 14577 Teil 4 empfohlen.

1) Es sind Härtemessungen mit mindestens 3 verschiedenen Lasten durchzuführen.

2) Die Messungen sind zu mitteln und auszuwerten. Die Ergebnisse werden in der Ergebnistabelle angezeigt:

3) Es ist eine Grafik des E-Moduls über der Tiefe aus diesen Ergebnissen zu erstellen. Dazu wird die Graph ***Schaltfläche*** in dem Results summary Fenster verwendet. Das Fenster **Data selection for graph** wird geöffnet. Wählen Sie die Spalte mit den Eindringtiefe Werten **h** für die X-Achse und drücken Sie OK. Dann wählen Sie die **E-Modul** Spalte E für die Y-Achse und drücken zweimal OK.

Results summary

No.	File	Sample	Sample no.	Avera	F	h	H	E	Er	ns	HM	HV	Creep
					mN	µm	GPa	GPa	GPa		GPa	kp/mm²	nm
1	Probe_2_B5_3mN.AVR	Probe_2	2	8	3.002	0.093	15.221	143.90	132.55	0.200	13.13	1439.1	0.6
2	Probe_2_B5_10mN.AVR	Probe_2	2	9	10.003	0.182	15.244	155.84	142.19	0.200	11.48	1441.3	2.7
3	Probe_2_B5_30mN.AVR	Probe_2	2	9	30.008	0.329	14.658	169.86	153.26	0.200	10.50	1385.9	4.3

Die Grafik mit mindestens 3 Punkten aus den Zeilen des Results summary Fensters wird nun im Fenster **Comparison** angezeigt.

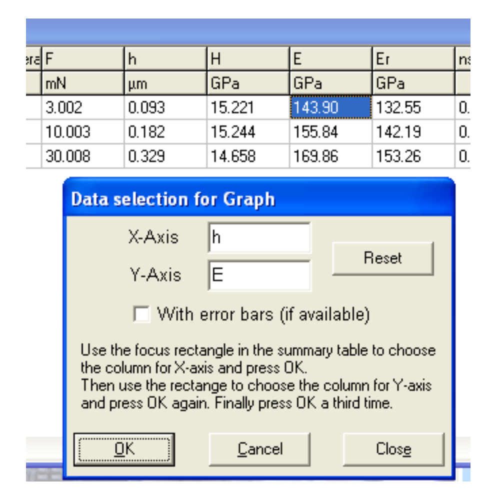


Abb. 62: Fenster zur Auswahl der Spalten für die graphische Darstellung

4) Drücken Sie die ***Fit*** Schaltfläche im Fenster **Comparison**. Das Fenster **Fit Data** wird angezeigt.

5) Drücken Sie die Schaltfläche ***Calculation*** im Fenster **Fit Data**. Ein linearer Fit wird durchgeführt (dies entspricht Fitfunktion 1, die voreingestellt ist).

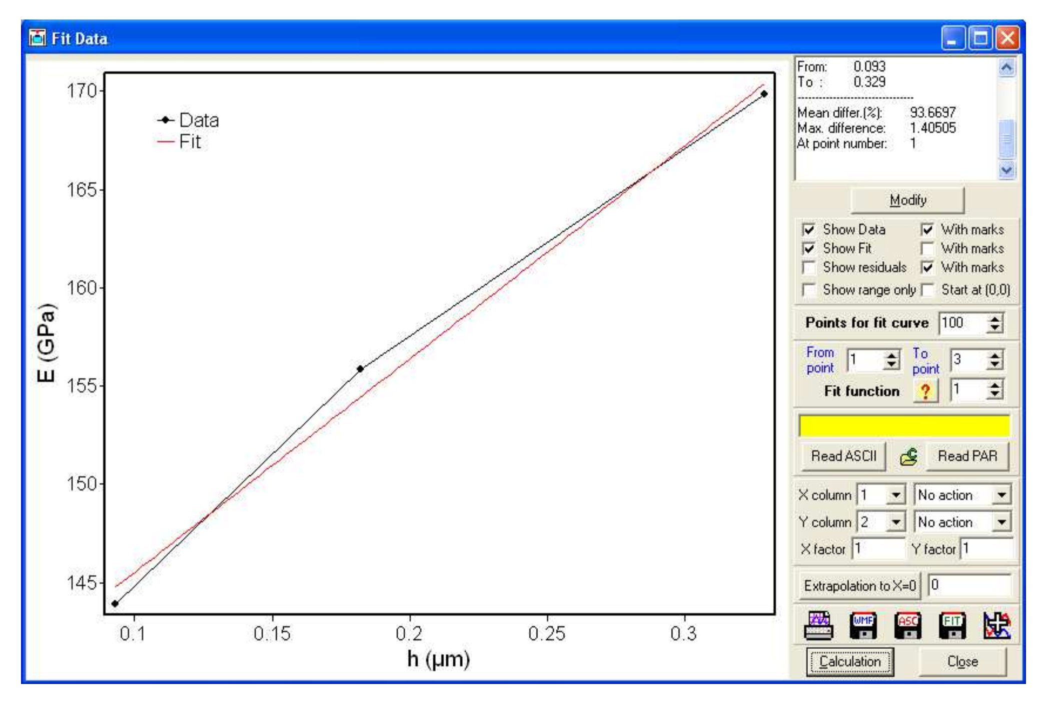


Abb. 63: Das Fit Data Fenster mit drei Punkten aus der Ergebnistabelle und einem linearen Fit (rot)

6) Drücken Sie nun die Schaltfläche ***Extrapolation to X=0***.

Der lineare Fit wird nun extrapoliert auf X=0 und das Ergebnis für den E-Modul (oder die Härte) bei Null Eindringtiefe wird in dem Feld rechts vom der Schaltfläche angezeigt (siehe den roten Pfeil in der nächsten Abbildung.

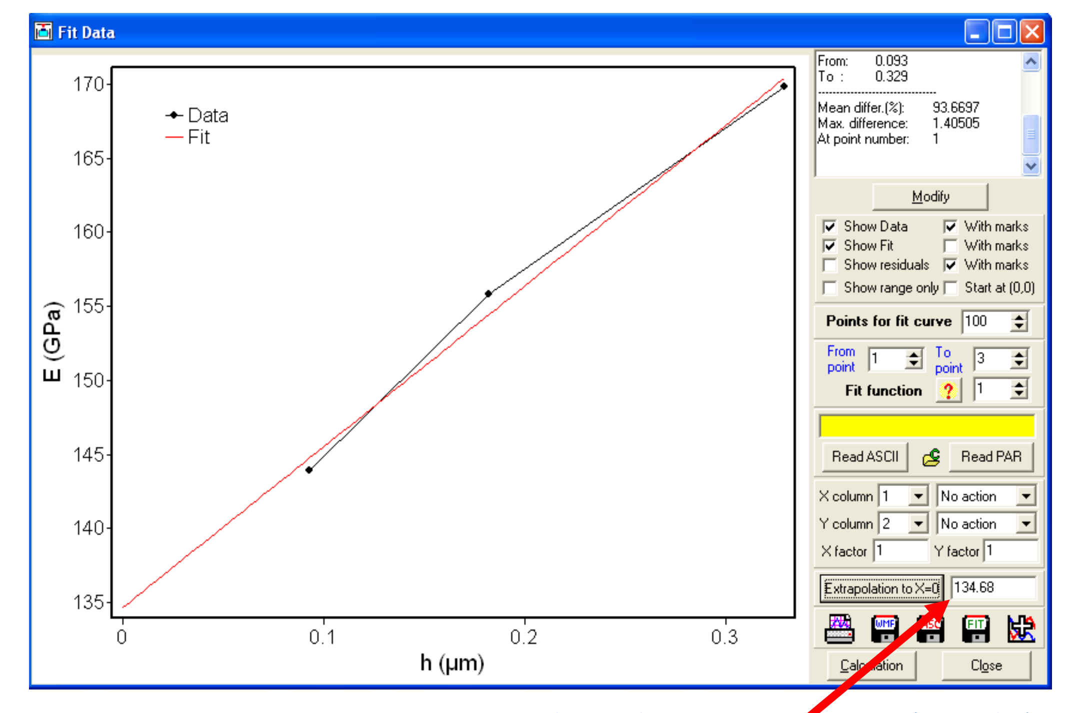


Abb. 64: Die Fitkurve nach der Extrapolation auf die Tiefe Null und dem Ergebnis (roter Pfeil)

Dieselbe Prozedur kann auch für QCSM Messungen verwendet werden.

1) Nutzen Sie in diesem Fall die Seite **Results over depth** im Fenster **Average results**.

2) Drücken Sie die Schaltfläche Add Graph um die Kurve für den E-Modul über der Tiefe in das Fenster **Comparison** zu kopieren.

3) Drücken Sie die ***Fit***-Schaltfläche im Fenster **Comparison**. Das Fenster **Fit Data** mit der übertragenen Messkurve wird angezeigt. Die grünen Punkte definieren den Fitbereich. Mit Doppelklick auf einen Punkt wird die linke Grenze des Fitbereichs festgelegt. Drücken Sie im Bereich **Define by double click** auf **Right end** um auch die rechte Grenze des Fitbereichs mit Doppelclick festzulegen.

4) Drücken Sie die Schaltfläche ***Calculation*** im Fenster **Fit Data**. Ein linearer Fit wird durchgeführt (dies entspricht Fitfunktion 1, die voreingestellt ist).

5) Drücken Sie nun die Schaltfläche ***Extrapolation to X=0***.

Der lineare Fit wird extrapoliert auf X=0 und das Ergebnis für den E-Modul (oder die Härte) bei Null Eindringtiefe wird in dem Feld rechts vom der Schaltfläche angezeigt.

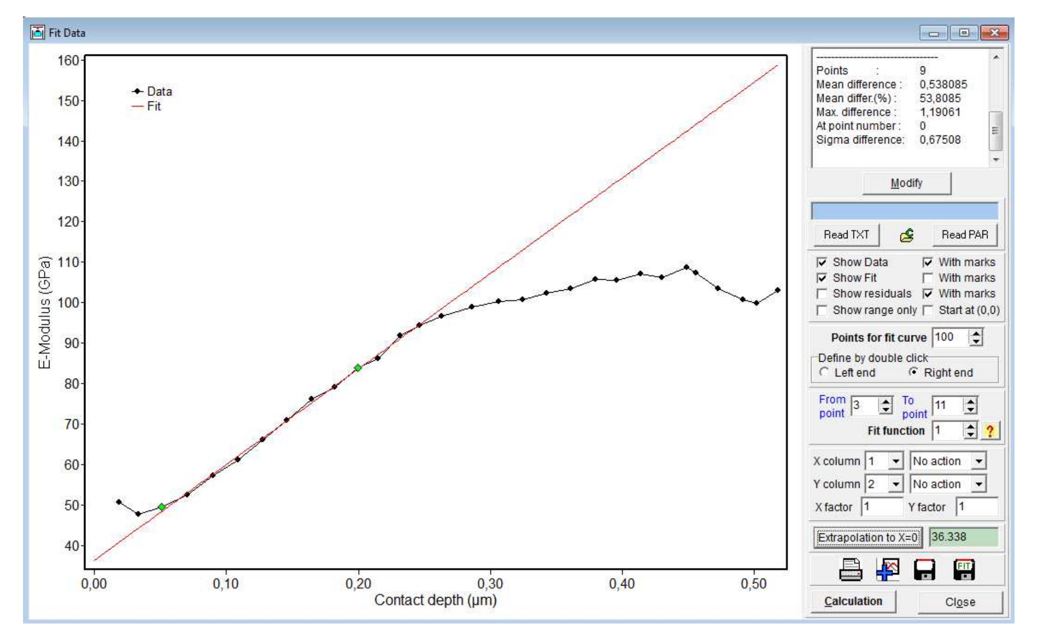


Abb. 65: Das ***Fit Data*** *Fenster mit Daten einer QCSM Messung an weichem DLC auf Si*

5.1.10 Bestimmung eines Härteverhältnisses oder einer -differenz zu einer Referenzmessung

Für sehr dünne Schichten oder eine Eindringtiefe unter 50nm wird empfohlen ein Härteverhältnis statt der absoluten Härtewerte zu verwenden, weil der Einfluss des Substrates oder der Spitzenverrundung des Eindringkörpers nicht vollständig korrigiert werden kann. Der Grenzwert für die Schichtdicke bei der Härtewerte gemessen werden können, hängt vom Spitzenradius und dem Härteverhältnis zwischen Schicht und Substrat ab.

Für die Auswertung ist es nicht erforderlich eine CSM/QCSM-Messung zu verwenden. Ein Härteverhältnis kann auch aus einer Martenshärte oder der *Estimated indentation hardness* bestimmt werden. Eine QCSM-Messung ist jedoch besser, da sie im kleineren Tiefenbereich genauer ist. Bei QCSM Messungen ist es außerdem möglich neben dem Härteverhältnis auch die Verhältnisse anderer Größen zu berechnen.

Folgende Schritte sind erforderlich:

1) Einlesen des ersten AVR-Files. Im Fenster **Average results** ist die Seite **Results over depth** auszuwählen.

2) Auswahl von **H - Indentation hardness** für die Y-Achse. Wenn keine QCSM/CSM-Ergebnisse verfügbar sind, kann auch *Estimated indentation hardness* oder *Martens hardness* verwendet werden.

3) Klicken auf ***Read reference*** und Einlesen des zweiten AVR-Files, mit dem die Härte verglichen werden soll. Die Härtekurve für die zweite Messung wird immer ohne Fehlerbalken dargestellt.

4) Klicken auf **Results ratio** im Feld **Show** Das tiefenabhängige Härteverhältnis zwischen Probe 1 und Probe 2 (die Referenzprobe) wird angezeigt. Eine horizontale Gerade mit dem Wert 1 würde sich ergeben, wenn zweimal das gleiche File eingelesen wird.

Beim Einlesen weiterer AVR-Files wird automatisch das Verhältnis zur selben Referenzmessung angezeigt.

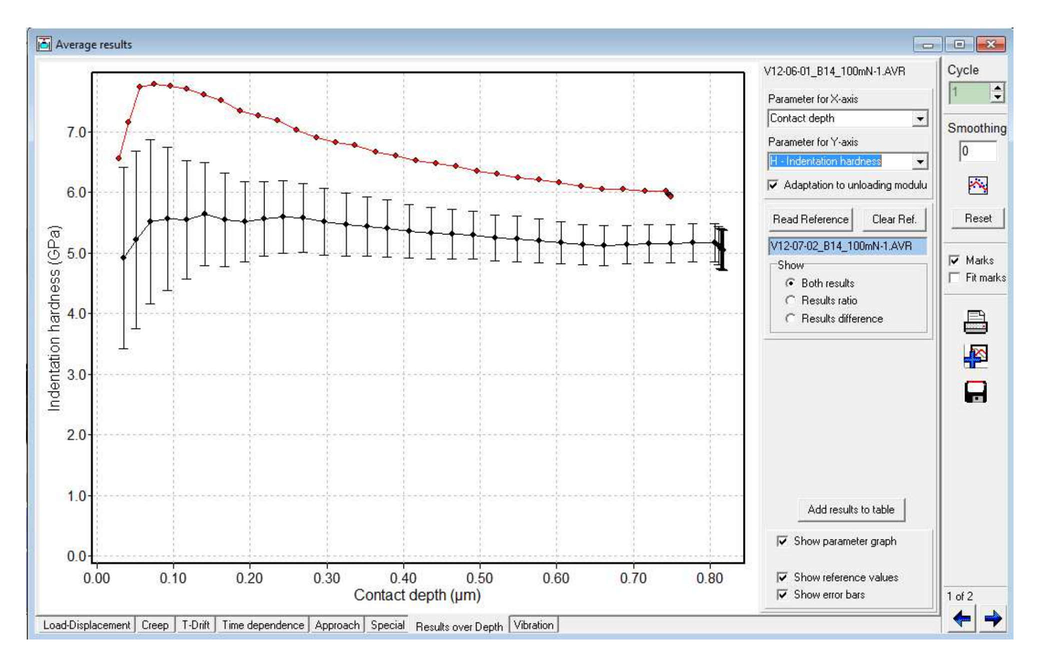


*Abb. 66: Das Fenster **Average results** mit den Härte-Tiefen-Kurven von zwei Proben*

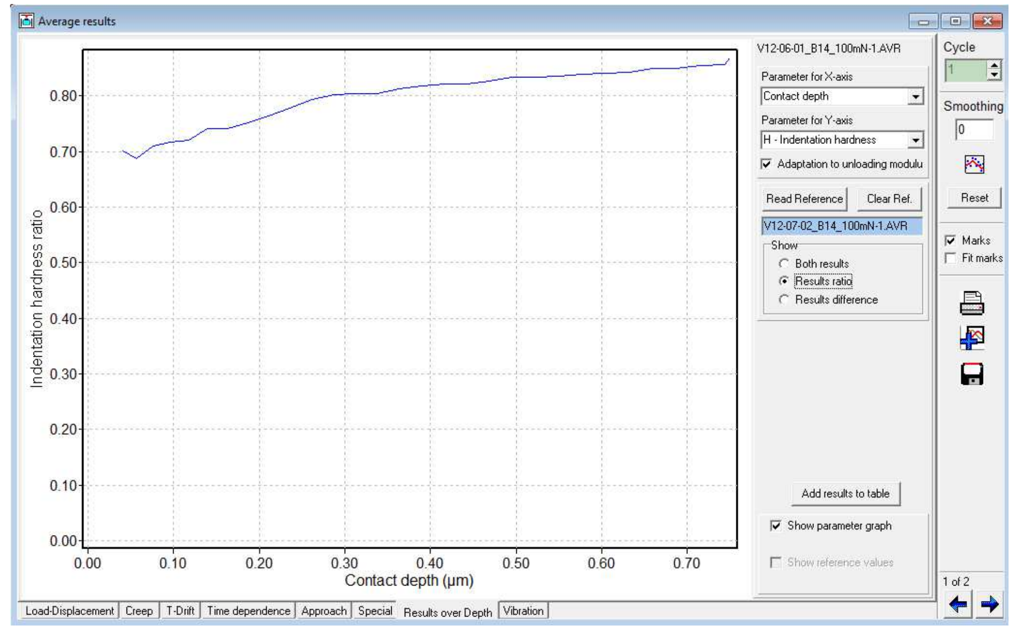


*Abb. 67: Das Fenster **Average results** mit dem berechneten Härteverhältnis*

Neben dem Härteverhältnis kann auch die Härtedifferenz durch Anklicken von **Results difference** dargestellt werden. Bei QCSM Messungen kann das Verhältnis von weiteren Größen gebildet werden, u.a. auch von der Martenshärte. Die folgende Abbildung zeigt für dieselben Proben des Beispiels die

berechneten Härteverhältnisse der Martenshärte und der Eindruckhärte (Indentation hardness). Der Unterschied kommt durch die Einbeziehung elastischer Deformationsanteile bei der Martenshärte zustande.

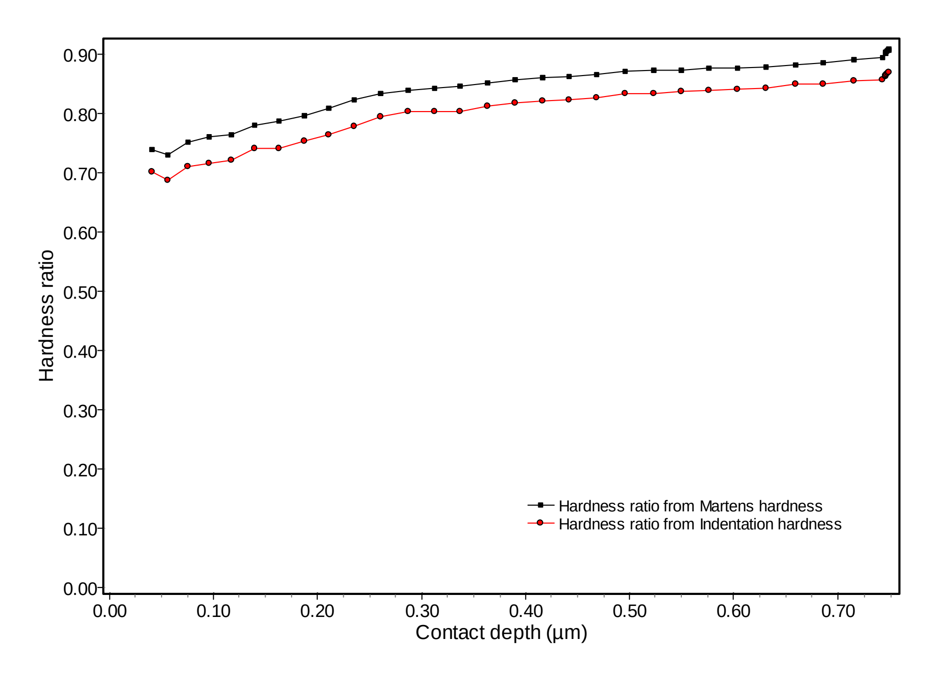


Abb. 68: Vergleich des Verhältnisses der Martenshärte und der Eindruckhärte für die gleichen Proben.

5.2 *Auswertung variabler Kraft-Eindringtiefe Messungen*

Diese Application (Anwendung) erlaubt eine vollkommen flexible Nutzung von Messungen unter Kraft- oder Wegsteuerung im Open- oder Closed-Loop-Mode ohne Begrenzung für die Parameter der Einzelsegmente. Dies beinhaltet auch Messungen ohne Oberflächenfindung (nur für Wegsteuerung) oder Messungen mit Entlastung bis zu negativer Eindringtiefe für die Analyse von Adhäsionseffekten.

Die Auswertung unter Verwendung des Fensters **Average results** wird für die Härte und den E-Modul nur vernünftige Ergebnisse liefern, wenn die Anwendung wie für einen normalen Härtetest programmiert wurde. In jedem anderen Fall muss die Auswertung durch den Anwender unter Nutzung des Fensters **Measurement data** erfolgen (das sich nach dem Einlesen eines DAT-Files öffnet) oder durch den Export der Daten in externe Software.

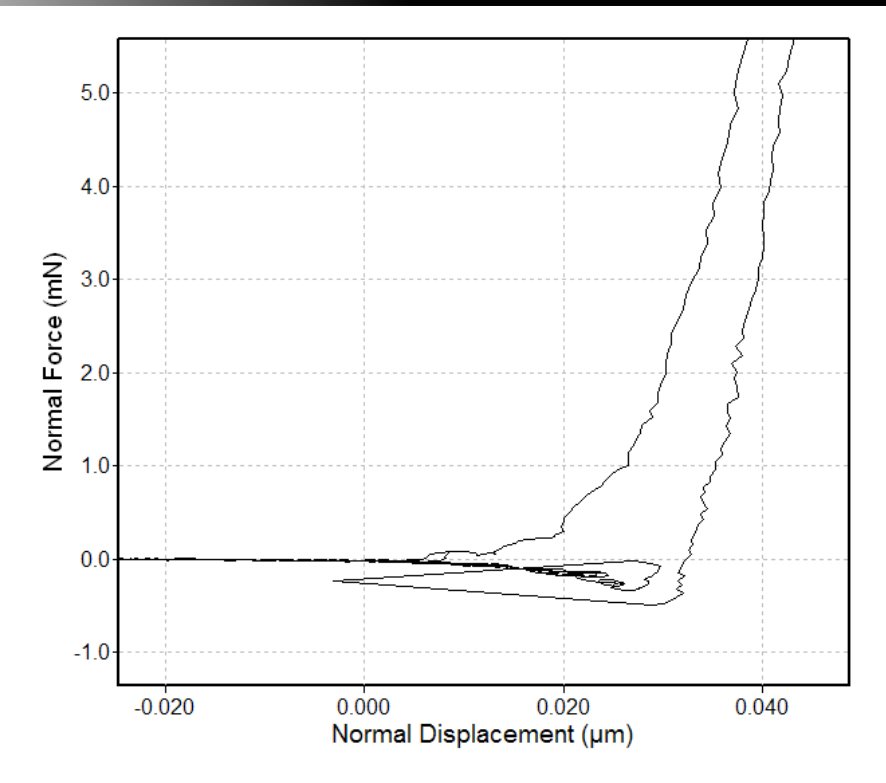


Abb. 69: Messkurve einer Adhäsionsmessung zwischen einer Si-Kugel und einer ebenen Si-Probe

Das Beispiel von Abb. 70 zeigt die Kraft-Verschiebungs-Messung unter Verwendung einer glatten Si-Kugel von 3mm Durchmesser gegen Silizium. Die Messung wurde unter Wegsteuerung durchgeführt. Durch Adhäsionseffekte ist eine negative Kraft notwendig ist, um die Kugel von der Probe zu entfernen. Die Verschiebung während der Entlastung wurde bis –50 nm durchgeführt.

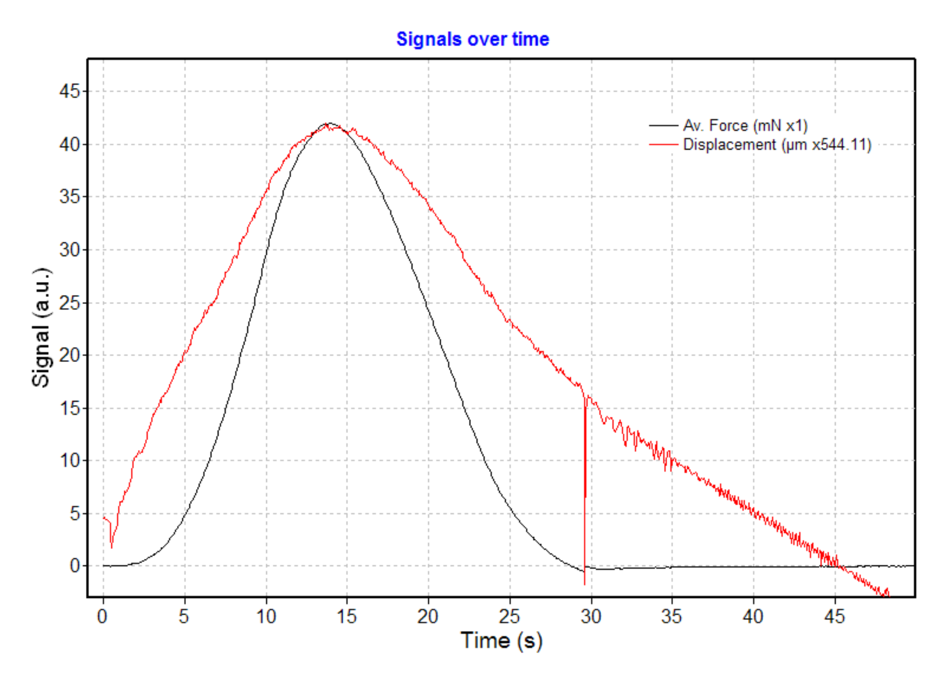


Abb. 70: Kraft- und Wegsignal einer Adhäsionsmessung an Si über der Zeit

Im Weg-Zeit-Signal kann der Moment des Wegschnappens der Kugel (Entfernung von der Oberfläche) durch den negativen Peak bei etwa 30s erkannt werden. Die Kraft betrug in diesem Moment -0.5mN. Dies entspricht der Adhäsionskraft. Anschließend bewirkt die Wegkontrolle eine Bewegung zurück zur geforderten Position für diese Zeit.

5.3 Auswertung zyklischer Härtemessungen

Die Auswertung erfolgt wie bei einem einfachen Härtetest im Fenster **Average results**. Der einzige Unterschied besteht darin, dass der Be-/ Entlastungszyklus für die Auswertung im oberen rechten Feld *Cycle* ausgewählt werden kann. Der Fit der Entlastungskurve wird dann für den entsprechenden Zyklus durchgeführt. Die rote Fitkurve und die Tangente werden für das lokale Maximum berechnet und angezeigt.

Das Beispiel in Abb. 71 zeigt Daten von zyklischen Messungen mit 10 Zyklen an Quarzglas. Zyklus 8 von 10 wurde für die Auswertung gewählt und die Ergebnisse für diesen Zyklus werden im Informationsfeld im rechten Teil des Fensters angezeigt.

Außerdem werden Härte oder E-Modul für jeden Zyklus über der Eindringtiefe auf der Seite **Results over Depth** dargestellt (Abb. 72). Die Parameter für die X-Achse und die Y-Achse können mit den entsprechenden Pull-down Menüs ausgewählt werden.

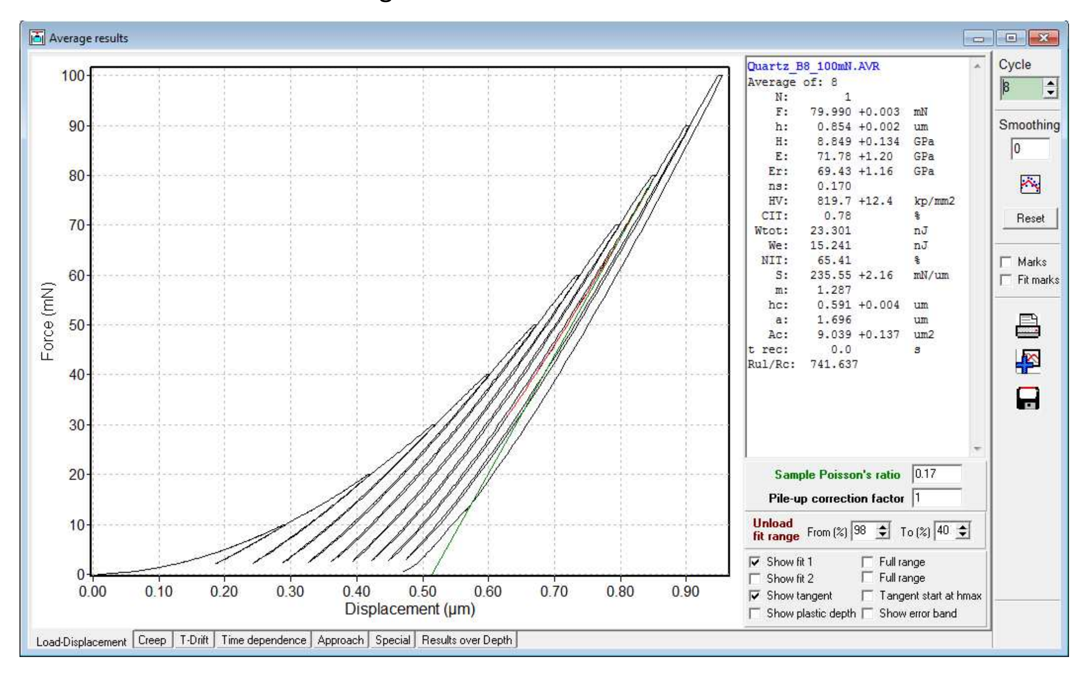


Abb. 71: Zyklische Messung an Quarzglas mit 10 Zyklen

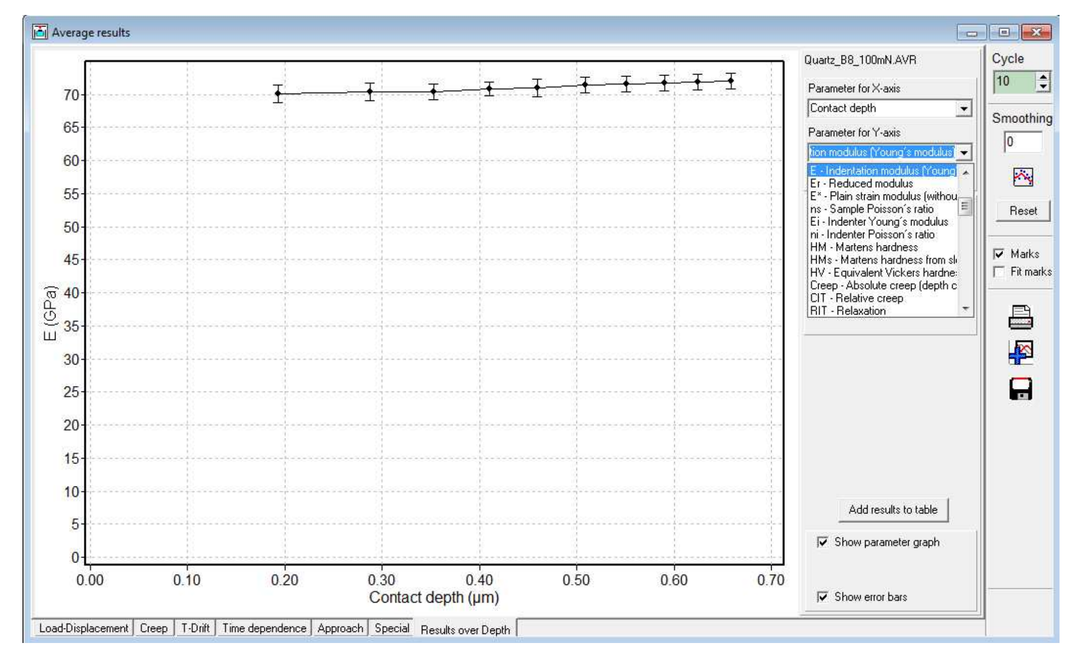


Abb. 72: E-Modul-Ergebnisse der zyklischen Messungen von Abb. 71 über der Tiefe

Auf der Seite **Creep** des Fensters **Average Results** sind mehrere Kriechkurven sichtbar, falls mehr als ein Kriech-Segment (Haltezeit bei lokaler Maximalkraft) während der Messung verwendet wurde. Dadurch lässt sich das Kriechverhalten in Abhängigkeit von der Maximalkraft vergleichen. In dem Beispiel wurden 10 Kriechsegmente von jeweils 10s verwendet. Insgesamt ist das Kriechverhalten von Quarzglas sehr gering.

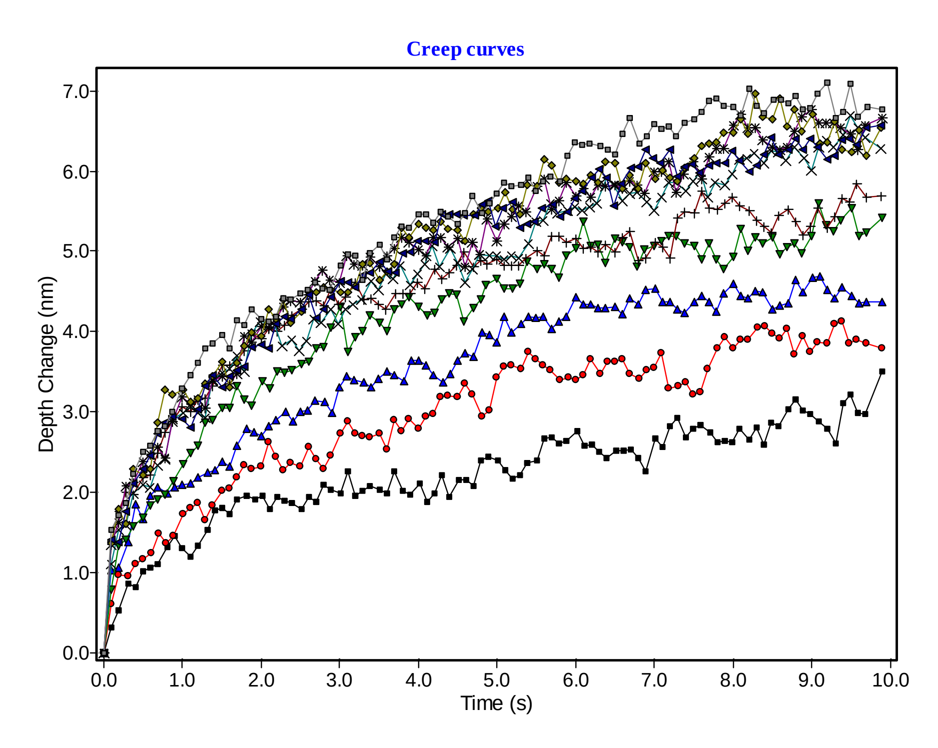


Abb. 73: Vergleich der Kriechkurven von 10 Haltezeiten einer zyklischen Messung an Quarzglas

Zyklische Messungen haben gegenüber QCSM Messungen den Nachteil, dass meist weniger Messpunkte über der Tiefe zur Verfügung stehen und dass die Messzeit größer ist. Dies führt wiederum zu einem größeren Einfluss der thermischen Drift. Außerdem können mit QCSM-Messungen genauere Ergebnisse für sehr kleine Kräfte erzielt werden.

5.4 Auswertung von CSM/QCSM-Messungen

Die „Quasi Continuous Stiffness Measurement“ Methode ist ein von ASMEC entwickeltes Modul, das es ermöglicht, die Kontaktsteifigkeit der Probe nicht nur mit Hilfe der Entlastungskurve für eine bestimmte Tiefe zu bestimmen, sondern für viele Punkte während des Eindringvorgangs. Dadurch können Härte und Elastizitätsmodul tiefenabhängig an ein und demselben Probenort ermittelt werden. Zusätzlich wird die Empfindlichkeit der Messung bei kleinen Kräften erhöht, so dass sich Steifigkeitswerte bereits für sehr geringe Kräfte und Eindringtiefen ermitteln lassen. Mit dem QCSM-Modul wird die Lastzunahme für kurze Zeit (typisch 3 s) gestoppt und der Piezospannung eine sinusförmige Schwingung überlagert. Im Gegensatz zu anderen Methoden wird die Amplitude für Kraft oder Weg nicht direkt vorgegeben. Mit einem Lock-In-Filter werden Amplitude und Phase der Schwingungen bestimmt.

Die Steifigkeit wird aus dem Quotient von Kraftamplitude und Wegamplitude berechnet. Dies ist äquivalent zur Bestimmung der Kontaktsteifigkeit durch Anpassung der Entlastungskurve und Verwendung des Anstiegs bei maximaler Belastung als Steifigkeitsergebnis.

$$S = \frac{dF}{dh} \approx \frac{\Delta F}{\Delta h}$$

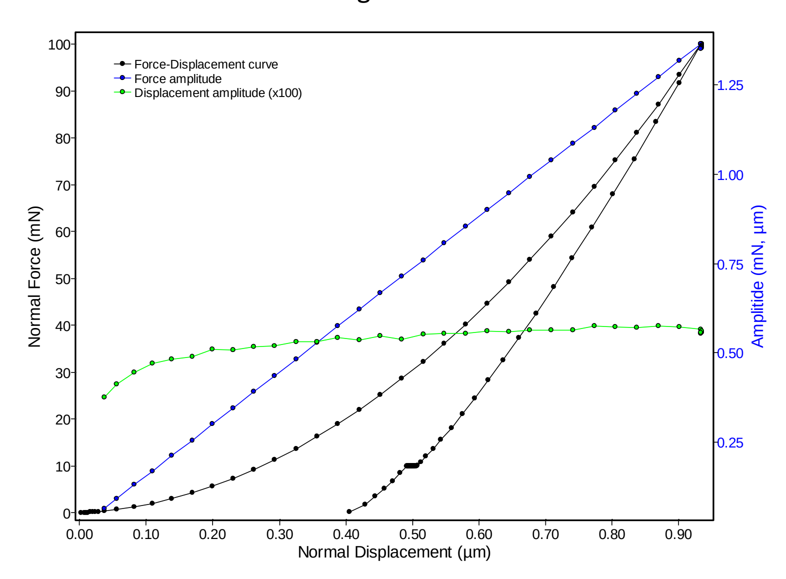
Die hohe Kontaktsteifigkeit (Anstieg der Entlastungskurve) verursacht auch bei größerer Piezo-Auslenkung oft ein sehr kleines Wegsignal der Schwingung. Der größere Teil der Piezoauslenkung wird für die Auslenkung der Federn für die Kraftmessung benötigt. Die Amplitude der Piezospannung muss so gewählt werden, dass das Wegsignal der Schwingung mindestens 2-3 nm beträgt. Mit der Standardeinstellung der QCSM-Applikation ergeben sich meist Wegamplituden zwischen 4 – 15 nm je nach Material.

Für eine genaue Bestimmung der Kontaktsteife muss die Differenz zwischen der Schwingungsfrequenz und der Resonanzfrequenz des Messkopfes muss groß genug sein. Deshalb sollten für die meisten Anwendungen nur Frequenzen bis zu 20 Hz verwendet werden. Es wird empfohlen, eine Frequenz zwischen 8 und 9 Hz zu verwenden (Standardeinstellung). Wenn es nicht auf die genaue Bestimmung der Kontaktsteife ankommt, wie bei Ermüdungstests, können auch Frequenzen bis 100 Hz eingestellt werden.

Anstelle von QCSM-Messungen können mit IndentAnalyser Version 3 auch CSM-Messungen durchgeführt werden, bei denen die Oszillation immer eingeschaltet ist und die Amplitude der Schwingung kontinuierlich bestimmt wird. Die Messung erfolgt dann nicht im **closed loop** sondern im **open loop** Mode.

Achtung: Die Schwingungsfrequenz muss in diesem Fall größer sein als die Datenrate.

Die Auswertung von Messungen mit QCSM Modul wird wie bei einem normalen Härtetest durchgeführt. Das Datenfile ist einzulesen und Nullpunkt- sowie thermische Driftkorrektur durchzuführen. Es sollte immer eine Driftkorrektur durchgeführt werden, da die Messzeit länger ist als bei schnellen Härtemessungen und die thermische Drift einen größeren Einfluss hat.



Das Fenster **Measurement data** zeigt neben der Kraft-Eindringtiefen-Kurve in Schwarz auch die Amplituden der Oszillation des Kraftsignals in **mN** (blau) und des Wegsignals in **µm** (grün). Beide Amplituden-Kurven gehören zur rechten Achse des Diagramms.

Die endgültige Auswertung der QCSM Daten findet im Fenster **Average results** statt. Für eine höhere Genauigkeit empfiehlt es sich, mehrere Messungen mit gleichen Parametern zu mitteln und nur die Mittelwertkurve auszuwerten.

Die Seite **Vibration** zeigt die Amplituden und die Phasenverschiebung zwischen der Piezo-Spannung (driving voltage) und dem Weg- und Kraftsignal. Diese Seite ist nur bei Daten des UNAT-Gerätes von ASMEC sichtbar. Im Gegensatz zu der CSM-Methode anderer Geräte, bei der die Schwingung direkt auf den Schaft mit der Messspitze aufgeprägt wird, und bei der die Phasenverschiebung zwischen Kraft- und Wegsignal direkt gemessen werden kann, ist bei der QCSM-Methode die Phase beider Signale nur bezüglich der Piezo-Spannung messbar. Sie stellt sich auch erst nach Oberflächenkontakt ein. Die



Phasenverschiebung zwischen Kraft- und Wegsignal wird dann durch Subtraktion der beiden Phasensignale bestimmt.

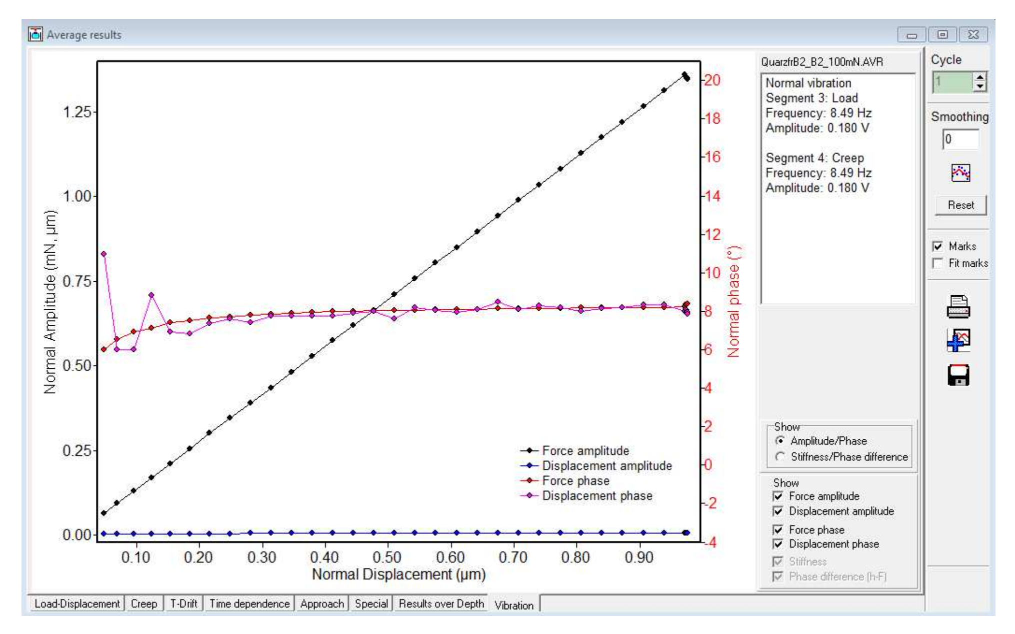


*Abb. 74: Phasenverschiebung und Amplituden von Kraft- und Wegsignal bei QCSM-Messungen auf der Seite **Vibration** des **Average results** Fenster*

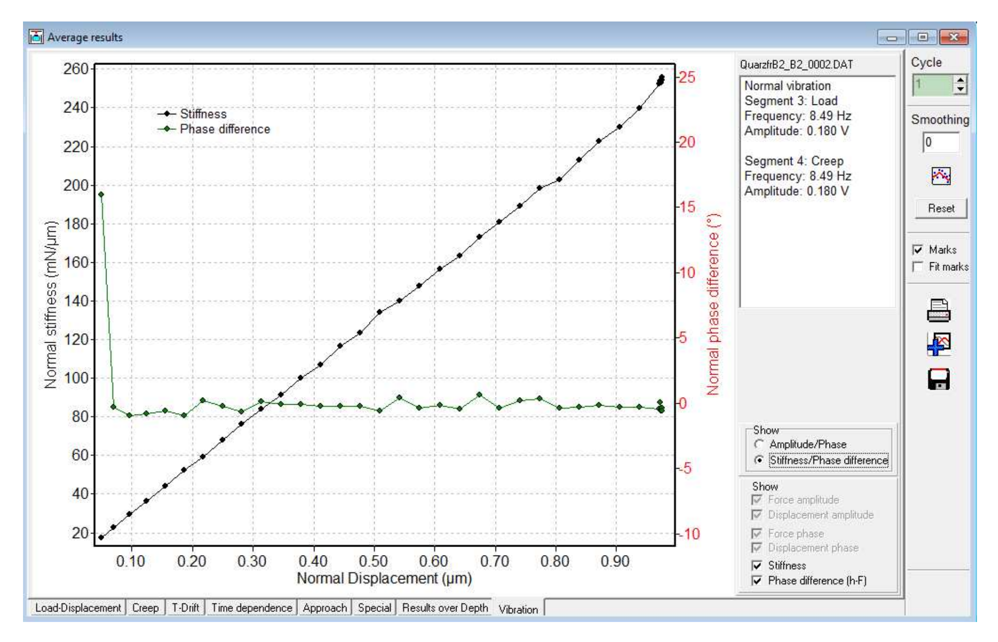


Abb. 75: Das selbe Fenster nach der Umschaltung auf die Darstellung von Kontaktsteife und Phasen-Differenz

Die Kontaktsteifigkeit wird aus dem Quotienten der Schwingungsamplituden von Kraft- und Wegsignal unter Berücksichtigung von Korrekturen bezüglich der Messe des Messkopfes und der Dämpfung in Abhängigkeit von der Frequenz berechnet.

Die Kontaktsteifigkeit und die Phasenverschiebung als Funktion der Eindringtiefe werden dargestellt, wenn der entsprechende Auswahlknopf **Show** auf der rechten Seite des Fensters angeklickt wird. Das Informationsfeld zeigt die verwendeten Parameter der QCSM Methode für alle Segmente an, bei denen die Schwingung eingeschaltet war.

Die gewünschten Parameter für die X- und Y-Achse können in den entsprechenden Pull-down Menüs ausgewählt werden (Abb. 76). Auf der Y-Achse kann außerdem angezeigt werden:

H/E-Verhältnis als Maß für die Fließdehnung (yield strain)

H^3/E^2 -Verhältnis als Maß für den Widerstand gegen plastische Deformation

E^2/H-Verhältnis als Maß für die Energiedissipation

Fehlerbalken werden angezeigt, wenn die Kurve ein Mittelwert aus mehreren Einzelmessungen ist. Die Fehlerbalken repräsentieren den statistischen Fehler, der entsprechend einer Student-Verteilung berechnet wird nach: $\Delta x = \frac{t \cdot \sigma}{\sqrt{n}}$ mit t(n) als Student-Faktor, σ als Standardabweichung und n als Anzahl der gemittelten Messungen.

Fehlerbeiträge durch Ungenauigkeiten der Kraft- oder Wegkalibrierung, der Gerätesteifigkeit oder der Flächenfunktion werden nicht berücksichtigt. Die Darstellung der Fehlerbalken kann mit der Checkbox **Show error bars** im unteren Teil des Fensters ausgeschaltet werden.

Auf derselben Seite kann eine Referenzmessung eingelesen werden und ein Härteverhältnis oder eine Härtedifferenz zu dieser Messung kann berechnet und angezeigt werden. Das ist besonders bei sehr dünnen Schichten nützlich, bei denen die Härte durch die Verrundung der Prüfspitze beeinflusst wird.

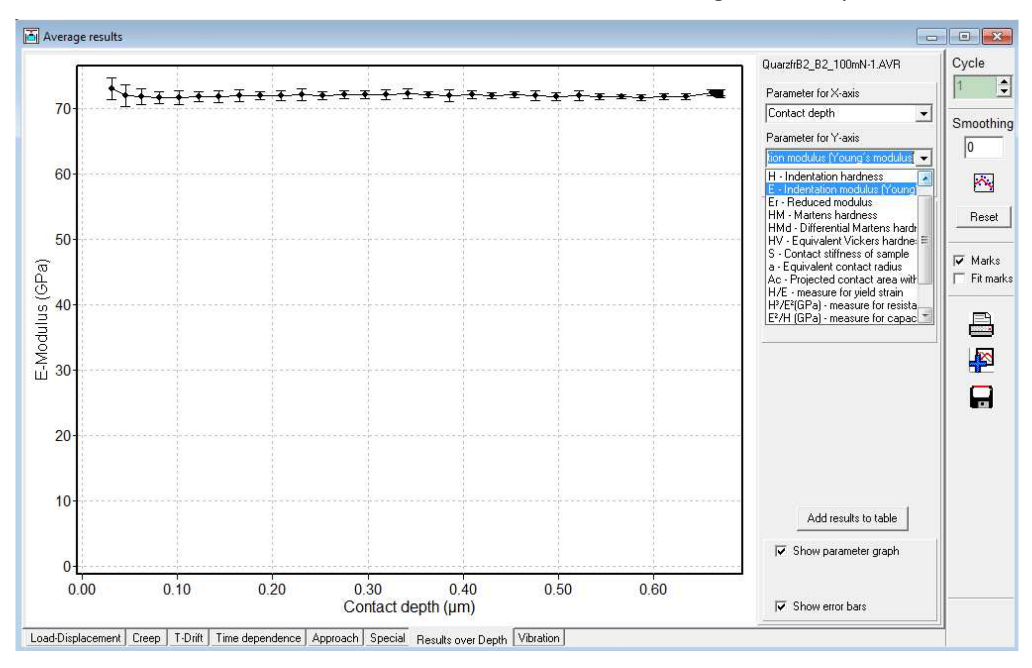


*Abb. 76: Die Seite **Results over Depth** des Fensters **Average results** mit dem Ergebnis einer QCSM Messung an Quarzglas*

5.5 *Elastische E-Modul-Messungen mit Kugelindentern*

Die Auswertung erfordert ein separat zu erwerbendes Softwaremodul.

Die Bestimmung des Elastizitätsmoduls dünner Schichten unter Verwendung vollständig elastischer Messungen mit einem Kugelindenter stellt eine neue Methode dar, die ein analytisches Modell für die Berechnung elastischer Deformationen beschichteter Systeme erfordert. Dieses Modell ist erst verfügbar seit 1999:

[T. Chudoba, N. Schwarzer, F. Richter, New possibilities of mechanical surface characterization with spherical indenters by comparison of experimental and theoretical results, Thin Solid Films 355-356 (1999) 284-289]

Die zugrundeliegende Theorie wurde durch N. Schwarzer entwickelt:

[N. Schwarzer, Arbitrary load distribution on a layered half space, ASME Journal of Tribology, 122 No. 4 (2000) 672-681]

Der Vorteil dieses Modells besteht darin, dass der Substrateinfluss auf das Ergebnis vollständig bestimmt und kompensiert werden kann. Deshalb kann der E-Modul sehr dünner Schichten <100nm bestimmt werden, obwohl oft Kräfte > 10mN für die Messung verwendet werden.

Die Methode kann nur verwendet werden, wenn Beschichtung und Substrat hart genug sind und die Oberflächenrauigkeit klein ist. Sie kann nicht angewandt werden auf Polymere oder weiche Metalle. Die Belastungs- und Entlastungskurve sollten besser als 1 bis 2 nm übereinstimmen.

Eine wichtige Modellannahme der Methode ist, dass der Kontaktdruck einem Hertzschen Kontakt entspricht. Vergleiche mit Finite-Element-Berechnungen haben gezeigt, dass diese Annahme richtig ist, wenn die Moduldifferenz zwischen Schicht und Substrat (oder zwischen verschiedenen Schichten) nicht größer als 1:4 bis 1:8 ist (in Abhängigkeit vom Verhältnis von Schichtdicke zum Kontaktradius). Die Methode liefert nur dann genaue Resultate, wenn diese Bedingung erfüllt ist.

Die Methode ist verfügbar für bis zu drei Schichten auf einem Substrat. Nur der Modul der obersten Schicht kann gefittet werden. Die elastischen Eigenschaften (Elastizitätsmodul und Poissonzahl) der anderen Materialien muss bekannt sein. Die Rechenzeit und der erforderliche Computerspeicher wachsen mit der Anzahl der Schichten.

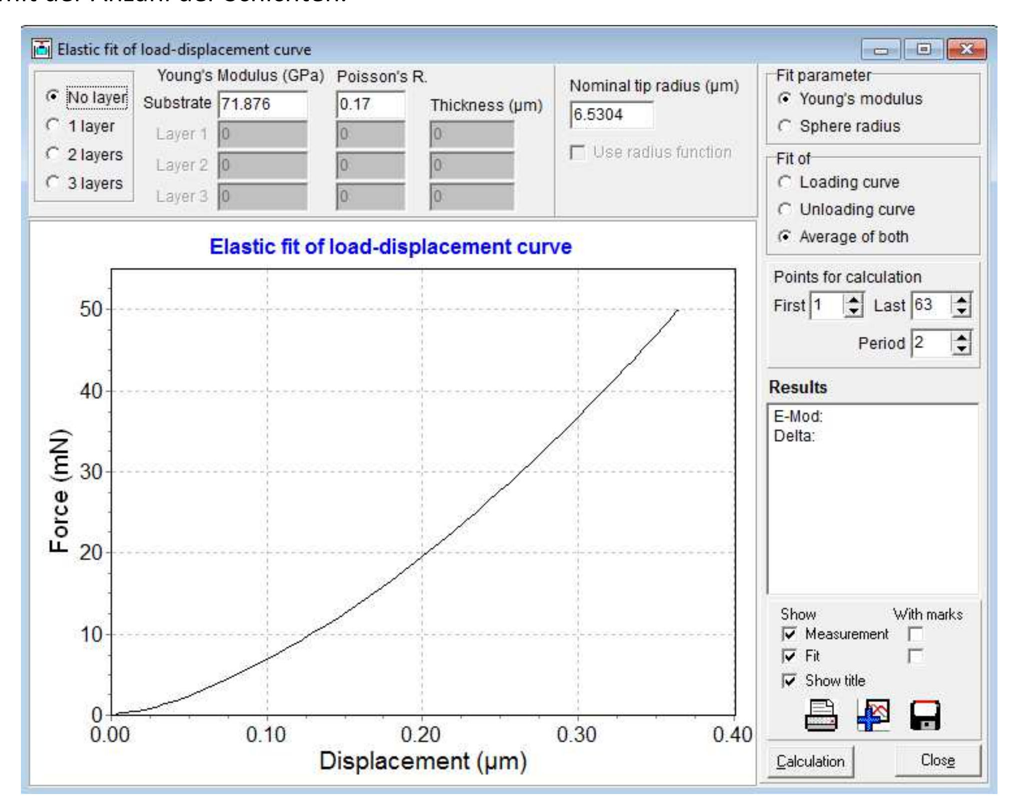


Abb. 77: Das Fenster für den Fit von elastischen Messkurven mit Kugelindenter

Ein Zugang zur elastischen Fitmethode ist nur möglich, wenn das Fenster **Average results** offen ist. Das Fenster **Elastic fit** kann dann geöffnet werden mit der Schaltfläche ***Elastic fit*** in diesem Fenster.

Das Fitfenster öffnet automatisch, wenn die Anwendung *Elastic modulus measurements with spheres* für die Messung verwendet wurde und das erforderliche Modul freigeschaltet ist.

Der ermittelte E-Modul und die Poissonzahl aus dem Fenster **Average results** werden automatisch in die Eigenschaftsfelder des Substrates übertragen. Bei der Kraft-Verschiebungs-Kurve werden Be- und Entlastungsteil getrennt dargestellt und ein Mittelwert beider Teile wird berechnet. Normalerweise ist der Mittelwert die genaueste Kurve, die für den Fit verwendet werden sollte. Die Auswahl erfolgt mit

Fit of
- Loading curve
- Unloading curve
- Average of both

den ***Fit of*** Schaltflächen.

Bitte beachten: Wenn eine Messung mit einem Anteil plastischer Verformung auswählt wird, stimmen Be- und Entlastungsteil nicht überein und die gemittelte Kurve ist keine Parabel mehr. In diesem Fall darf nur die Belastungskurve verwendet werden. Eine solche Berechnung ist möglich, wenn der erste Teil der Belastungskurve elastisch ist und nur die ersten Punkte der Belastungskurve für den Fit verwendet werden.

Der Aufbau der Probe wird durch die Eingabefelder links oben festgelegt. Nach Öffnen des Fensters ist keine Schicht eingestellt. Die Anzahl der Schichten ist mit der entsprechenden Schaltfläche auszuwählen und die Werte für den E-Modul und die Poissonzahl des Substrats und gegebenenfalls von Zwischenschichten sind in die Felder einzutragen. Die Schicht mit der höchsten Nummer ist immer die oberste Schicht. Für die zu berechnende Schicht ist ein Schätzwert einzutragen. Wenn er weit weg vom berechneten Wert liegt, kann die Rechnung sehr lange dauern.

Die Dicke der Schichten muss möglichst genau bekannt sein. Das Ergebnis hängt empfindlich von der korrekten Dicke der obersten Schicht und den E-Modulwerten für Substrat und Zwischenschichten ab. Falls der E-Modul des Substrates nicht bekannt ist, kann er vorher mit derselben Methode an einer unbeschichteten Probe gemessen werden

Fitparameter: Legt den Ergebnistyp fest. **Young's modulus** ermittelt den E-Modul der obersten Schicht oder des Substrates an (wenn keine Schichten vorhanden sind). **Sphere radius** ermittelt den Radius des Indenters, wenn die elastischen Parameter der Probe bekannt sind.

Nominal tip radius: Der Radius des Indenters wird für einen Fit des E-Moduls benötigt. Der Wert aus der Konfiguration wird automatisch in dieses Feld übertragen und kann hier geändert werden.

Use radius function: Das Kontrollkästchen ist verfügbar, wenn in der Konfiguration eine effektive Radiusfunktion anstelle einer Flächenfunktion verwendet wird. Eine effektive Radiusfunktion kann die Fitgenauigkeit verbessern, besonders wenn der Spitzenradius mehr als 5% im Eindringtiefenbereich der Messung variiert.

Points for calculation: Legt den ersten und letzten Datenpunkt der Kurve für die Berechnung fest.

Period: Wenn viele Datenpunkte vorhanden sind (50 oder mehr), ist es besser nicht alle Daten zu verwenden, sondern beispielsweise nur jeden dritten Punkt. Dies kann die Rechenzeit merklich reduzieren. Das Feld **Period** gibt die Anzahl der Punkte zwischen zwei Berechnungspunkten an, die nicht verwendet werden. Der erste und der letzte Punkt werden entsprechend den Feldern *First* und *Last* immer verwendet. Die letzte Periode kann deshalb kleiner als die anderen sein.

Calculation: Startet die Berechnung. Die Fitkurve wird rot dargestellt.

Results: Das Feld zeigt das Fitergebnis für den E-Modul oder Radius und die mittlere absolute Differenz (Mean D) zwischen den Messdaten und der Fitkurve an. Die Differenz ermöglicht eine Einschätzung der Fitgenauigkeit. Sie sollte unter 2 nm für eine Eindringtiefe unter 1 µm bzw. unter 1 nm für eine Eindringtiefe unter 100 nm liegen. Der Feldinhalt kann markiert und in die Zwischenablage kopieren werden.

Ein Informationsfenster mit einer Schaltfläche ***Cancel*** erscheint, wenn eine Berechnung läuft. Mit ihr kann die Berechnung gestoppt werden.

Close: Schließt das Fenster. Dies ist nur möglich, wenn kein Rechenvorgang läuft.

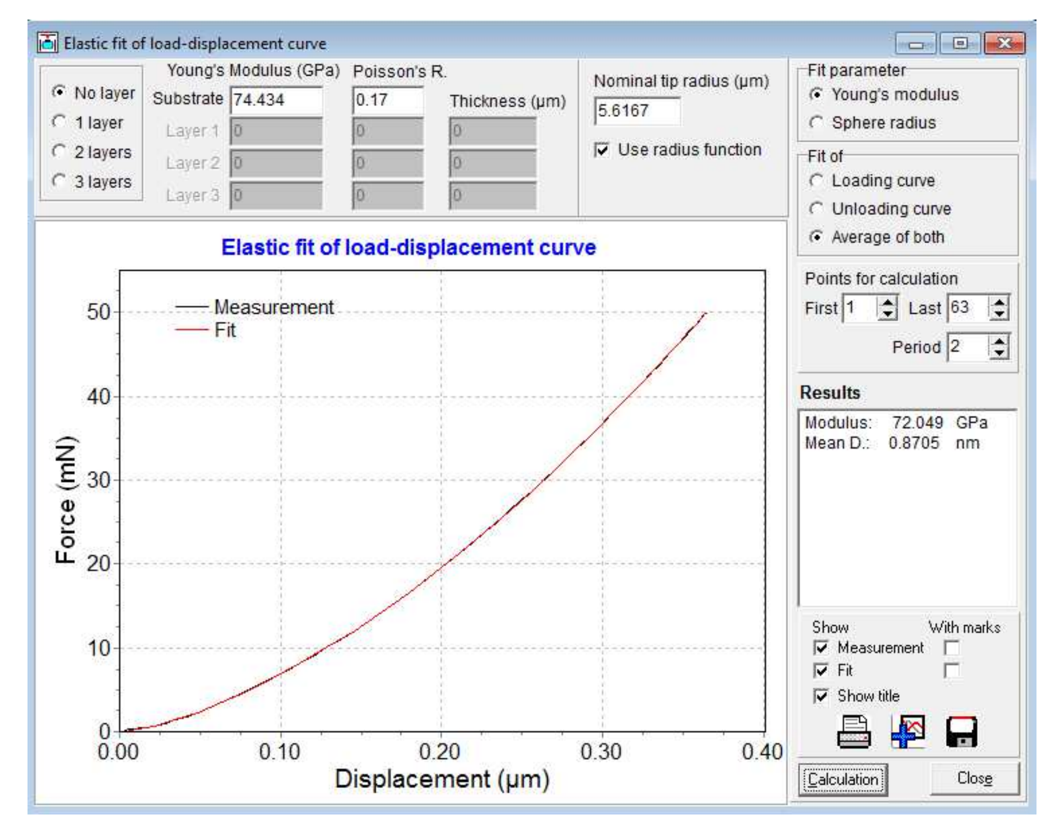
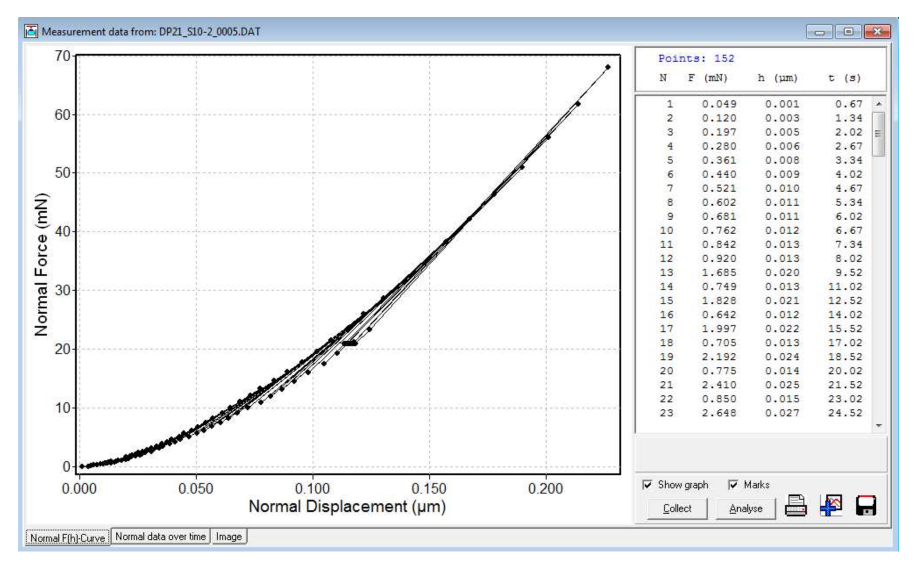


Abb. 78: Das Fitergebnis für Quarzglas (ohne Schichten) unter Berücksichtigung der Radiusfunktion

5.6 Auswertung von zyklischen Messungen zur Fließgrenzen-bestimmung

Die kritische Last für den elastisch-plastischen Übergang (Fließgrenze) eines Materials kann mittels zyklischer Be-/Entlastungs-Messungen mit Kugelindenter bestimmt werden. Die von Mises Spannung als ein Maß für die Fließgrenze kann man aus einer nachfolgenden Rechnung mit dem externen Programm **ELASTICA** von ASMEC erhalten. Dieses Programm ist nicht Bestandteil der IndentAnalyser Software.



Points: 152

N	F (mN)	h (µm)	t (s)
1	0.049	0.001	0.67
2	0.120	0.003	1.34
3	0.197	0.005	2.02
4	0.280	0.006	2.67
5	0.361	0.008	3.34
6	0.440	0.009	4.02
7	0.521	0.010	4.67
8	0.602	0.011	5.34
9	0.681	0.011	6.02
10	0.762	0.012	6.67
11	0.842	0.013	7.34
12	0.920	0.013	8.02
13	1.685	0.020	9.52
14	0.749	0.013	11.02
15	1.828	0.021	12.52
16	0.642	0.012	14.02
17	1.997	0.022	15.52
18	0.705	0.013	17.02
19	2.192	0.024	18.52
20	0.775	0.014	20.02
21	2.410	0.025	21.52
22	0.850	0.015	23.02
23	2.648	0.027	24.52

Abb. 79: Eine zyklische Messkurve zur Bestimmung der Fließgrenze im Fenster Measurement data

Die Messung wird mit der vordefinierten Anwendung (Application) *Yield strength by cyclic measurements with spheres* durchgeführt. Nach der Messung oder nach Einlesen eines DAT-Files mit einer solchen Messung wird die Messkurve im Fenster **Measurement data** angezeigt.

Durch Drücken der Schaltfläche ***Analyse*** werden zunächst Nullpunktkorrektur und Korrektur der thermischen Drift ausgeführt. Der zeitliche Verlauf der Messung ist auf der Seite *Normal signals over time* zu sehen.

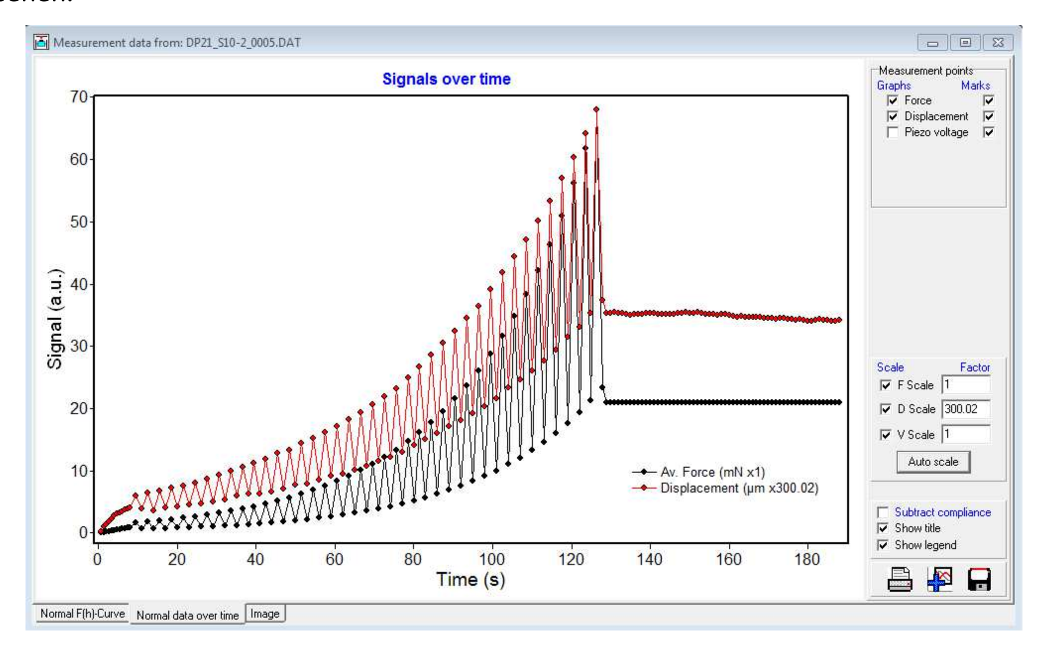


Abb. 80: Der Zeitliche Verlauf einer Messung zur Bestimmung der Fließgrenze mit einer Haltezeit zur Bestimmung der thermischen Drift am Ende.

Nach Ausführung der Korrekturen oder nach Einlesen des AVR-Files mit einer solchen Messung wird automatisch das Fenster **Average results** in einer anderen Ansicht als für normale Härtemessungen geöffnet. Für die Verbesserung der Genauigkeit solchen Messungen ist es sinnvoll, zunächst eine Anzahl gleicher Messungen zu Mitteln und nur die gemittelte Kurve auszuwerten.

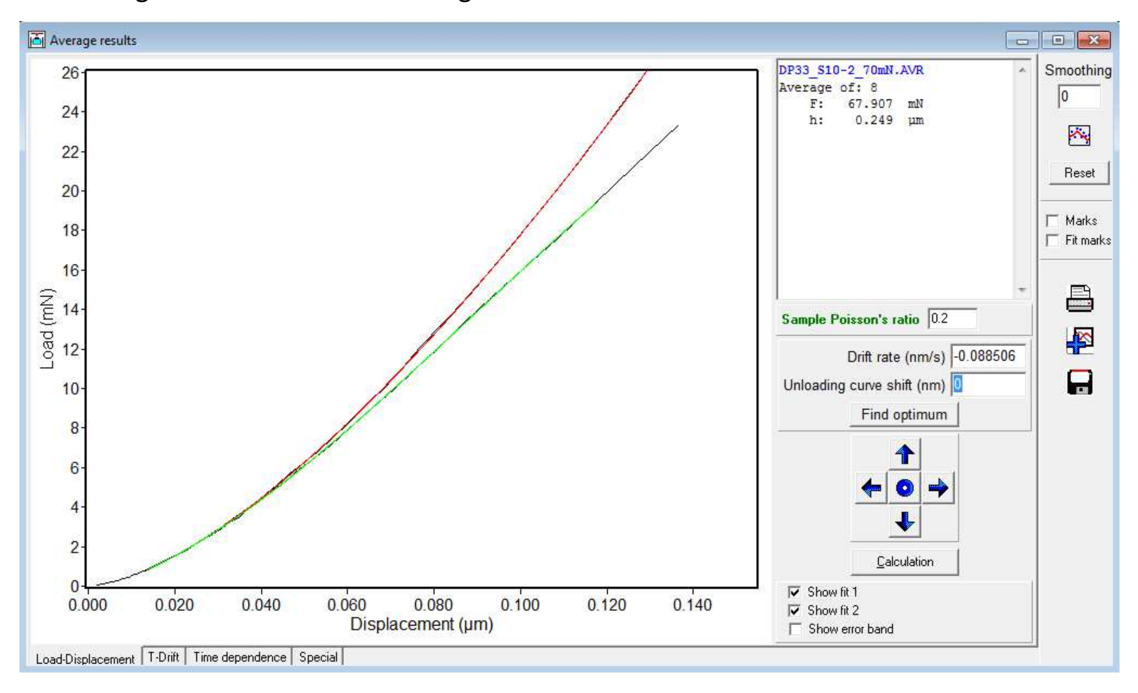


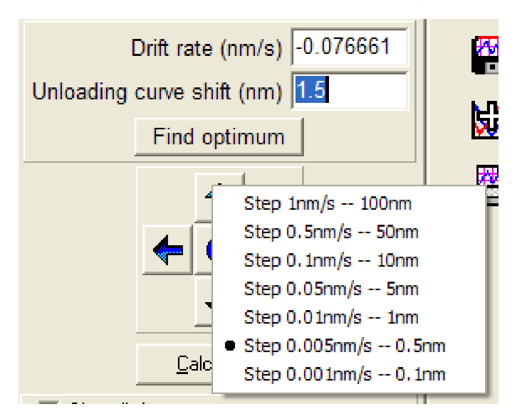
Abb. 81: Das Fenster Average results für die spezielle Art von zyklischen Messungen

In dem speziellen **Average results** Fenster werden die Punkte der Belastungszyklen (immer nur 1 Punkt) ebenso wie die Punkte der Entlastungszyklen durch zwei schwarze Linien verbunden. Diese beiden Kurven von Messdaten werden durch eine rote Fitkurve für die Belastungswerte und eine grüne Fitkurve für die Entlastungswerte angenähert.

Im rein elastischen Bereich sollten beide Kurven bei kleinen Eindringtiefen übereinstimmen. Es gibt jedoch oft von Anfang an einen kleinen Unterschied zwischen beiden Kurven infolge des Einflusses der thermischen Drift und der Oberflächenrauigkeit. Dies kann korrigiert werden durch Verwendung der Schaltfläche ***Find optimum***. Nun wird die beste Anpassung zwischen roter und grüner Kurve im unteren Kraftbereich durch Änderung der thermischen Driftrate (Drift rate) und durch Verschieben der Entlastungskurve (Unloading curve shift) um sehr kleine Beträge (0.1-10 nm) gesucht. Die Ergebnisse für die Driftrate und die Verschiebung der Entlastungskurve werden in den zugehörigen Feldern gezeigt.

Beide Korrekturen können durch Verwendung der blauen Pfeiltasten auch manuell durchgeführt werden. Durch Drücken der Auf- oder Ab-Taste wird die Kurve mit den Entlastungspunkten nach rechts oder links verschoben. Die Standardschrittweite ist 0.5 nm. Die Schrittweite kann durch Anklicken der Pfeiltasten mit der rechten Maustaste modifiziert werden.

Durch Drücken der Links- oder Rechts-Taste wird die Driftrate in Schritten von 0.005 nm/s erhöht bzw. verringert. Die Schrittgröße kann auch in einem pull-down Menü gewählt werden (nächste Abbildung).



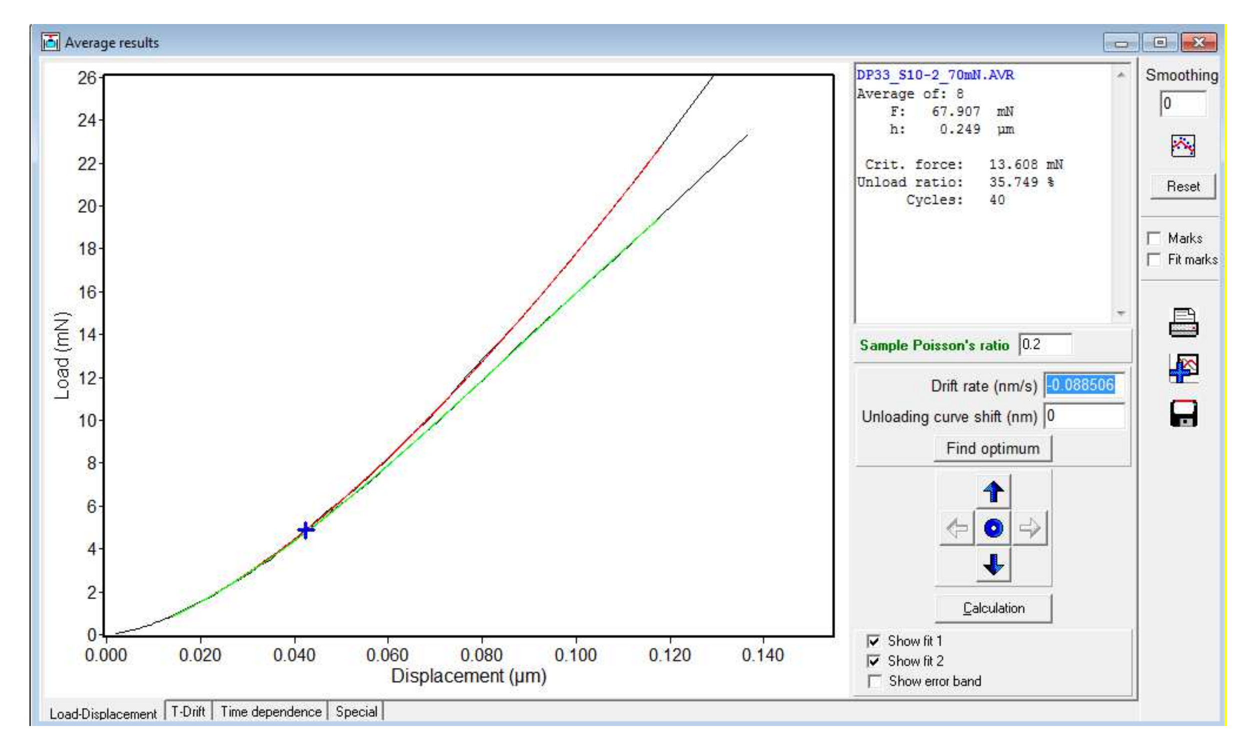


Abb. 82: Auswertefenster für zyklische Messungen nach Drücken von Calculation

Nach dem Finden der optimalen Übereinstimmung zwischen beiden Kurven muss die kritische Last für den elastisch-plastischen Übergang definiert werden. Das ist der Punkt, wo Belastungs- und Entlastungskurve beginnen auseinanderzulaufen.

Mit Drücken von ***Calculation*** startet die automatische Identifikation dieses Punktes. Der Beginn des Fließens wird durch ein blaues Kreuz markiert.

Die Lage des blauen Kreuzes kann anschließend per Hand noch angepasst werden. Dazu sollte der Diagrammbereich um das Kreuz (siehe Abb. 83) vergrößert werden. Das Kreuz kann mit den blauen Pfeiltasten zu dem Punkt verschoben werden, wo die erste merkliche Differenz zwischen den Kurven erkannt wird.

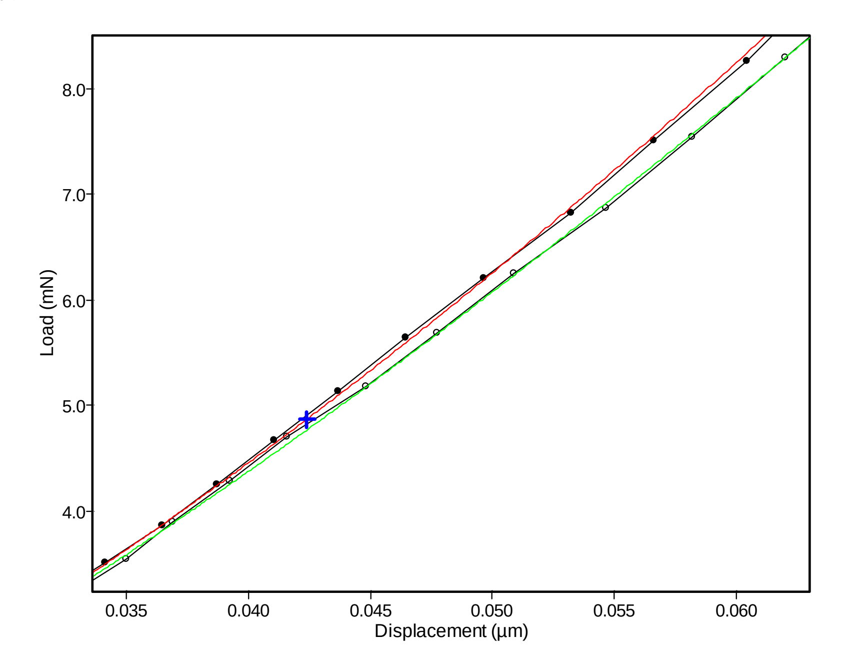


Abb. 83: Definierter Punkt für den elastisch-plastischen Übergang bei einer Kraft von 13,6mN

Die **kritische Kraft** für die Fließgrenze wird im rechten Teil des Fensters angezeigt. Es ist der Kraftwert der Y-Achse, dividiert durch das Entlastungsverhältnis (Quotient aus Kraft nach der Entlastung und Maximalkraft des gewählten Zyklus). Im Beispiel wurde eine kritische Kraft von 134.608 mN erreicht mit einem Entlastungsverhältnis von 35.75%.

Die Software **ELASTICA**© ist notwendig, um die von Mises-Spannung als Maß für die Fließspannung zu bestimmen. Die Eingangsparameter für die Berechnung (Indenterradius, kritische Kraft) können den IndentAnalyser-Ergebnissen entnommen werden.

5.7 Auswertung mit neuronalen Netzen (optional)

Stress-strain Zur Bestimmung von Materialparametern von **metallischen Materialien** aus Eindruckmessungen kann das Modul ***Stress-strain*** verwendet werden, wenn bei den Experimenten ein vorgeschriebener Belastungsverlauf mit einem Kugelindenter verwendet wurde.

Der Messablauf sieht im Verlauf der Belastung bei gleichen Kraftabständen drei Kriechphasen von je 100 s und am Ende eine Kriechphase von 600 s vor. Außerdem muss die Eindringtiefe etwa 10% ± 2% des Indenterradius betragen.

Die Grundlage des Identifikationsverfahrens ist die Annahme eines Werkstoffmodells der Viskoplastizität, das in der Lage ist, die wichtigsten Phänomene metallischer Werkstoffe unter mechanischer Belastung zu beschreiben. Bei monotoner Belastung und kleinen Dehnungen repäsentieren die Bestimmungsgleichungen ein Chaboche Modell. Es gelten folgende Formeln:

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_i$$

$$\sigma = E \cdot \varepsilon_e$$

$$\dot{\varepsilon}_i = \frac{\langle F \rangle^m}{\eta}$$

$$F = \sigma - k \; \left(= (\eta \cdot \dot{\varepsilon}_i)^{1/m} \right)$$

$$k = k_0 + \frac{\gamma}{\beta} \cdot \left(1 - e^{-\beta s}\right)$$

$$s = \int_{\tau=0}^{t} \dot{\varepsilon}_i(\tau) d\tau$$

$$\Delta\Sigma = \lim_{s\to\infty} \sigma - k_0 = \frac{\gamma}{\beta} + \frac{3}{2}\frac{c}{b}$$

$$\sigma' = \lim_{s\to 0} \frac{d\sigma}{ds} = \gamma + \frac{3}{2} c$$

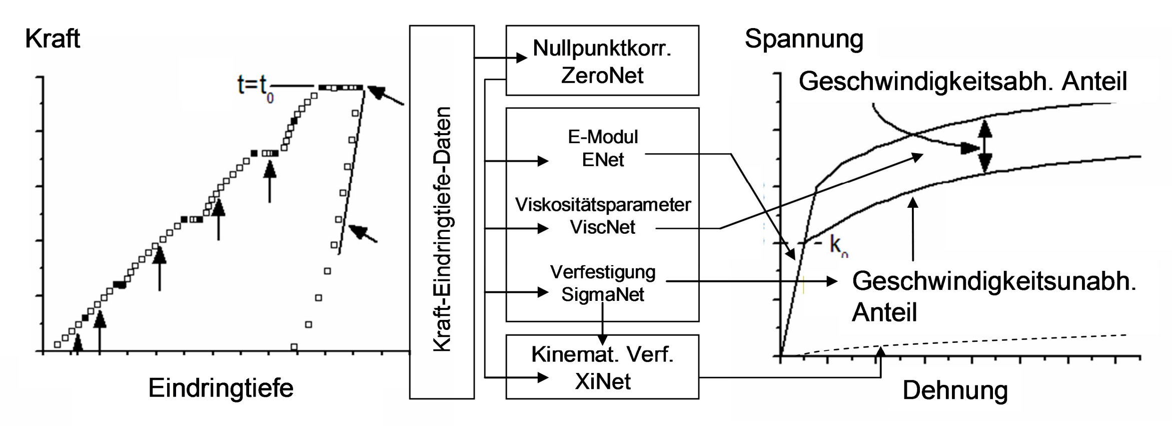
Variable	Symbol	Einheit
Totale Dehnung	ε	-
Elastische Dehnung	ε_e	-
Inelastische Dehnung	ε_i	-
Inelastische Dehnrate	$\dot{\varepsilon}_i$	s^{-1}
Accumulierte inel. Dehnung	s	-
Spannung	σ	MPa
Überspannung	F	MPa
Isotropische Härtung	k	MPa
Elastizitätsmodulus	E	GPa
Viscositätsexponent	m	-
Viscositätsparameter	η	MPa*ms*
Anfängliche Überspnnung	F_0	MPa
Fließspannung	k_0	MPa
Anfänglicher Anstieg Verfestigung	γ	MPa
Verfestigungsparameter	β	-

Für die rein plastische Spannungs-Dehnungs-Relation gilt schließlich:

$$\sigma(\varepsilon_p) = k_0 + \frac{\gamma}{\beta}\left(1 - e^{-\beta\varepsilon_p}\right) + \frac{3}{2}\frac{c}{b}\left(1 - e^{-b\varepsilon_p}\right)$$

Der erste Term ist die Fließspannung, der zweite Term die isotrope Verfestigung und der dritte die kinematische Verfestigung.

Auf der Basis dieses Materialmodells wurde eine große Zahl von Finite-Elemente-Simulationen zur Berechnung des Verformungsverhaltens (Last-Eindringtiefe-Kurven) während einer Eindringprüfung durchgeführt. Mit den so erhaltenen Simulationsdaten wurden Neuronale Netze trainiert, wie sie im folgenden Bild dargestellt sind.



Je ein Neuronales Netz ist zuständig für die Ermittlung

- des Nullpunktes
- des E-Moduls
- der geschwindigkeitsabhängigen Überspannung sowie
- des Verfestigungsverhaltens

Optional bietet das Neuronale Netz die Möglichkeit, aus einer abschließenden Entlastungs-Wiederbelastungs-Hysterese die kinematische Verfestigung des Werkstoffs als einen Anteil des Verfestigungsverhaltens zu ermitteln, der für die Erfassung des zyklischen Verformungsverhaltens von Bedeutung ist.

Dem Nutzer werden verschiedene Lösungsmethoden innerhalb des Moduls angeboten:

1) Mit dem klassischen Neuronale-Netze-Ansatz werden besonders schnell komplizierte nichtlineare Zusammenhänge durch eine Approximation des inversen Zusammenhanges gelöst.

2) Mit probabilistischen Neuronalen Netzen wird zusätzlich eine Schätzung der Unsicherheit der Ergebnisse (in Form von Konfidenzintervallen) mitgeliefert. Diese Netze benötigen im Gegensatz zu klassischen Netzen keine Verifikationsbeispiele beim Lernen.

(A) Bei der Gauss-Approximation wird die Verteilung der Ergebnisse mit einer Gauss-Verteilung in jedem lokalen Optimum approximiert und anschließend werden die Lösungen gemittelt.

(B) Die Markov-Ketten-Monte-Carlo-Berechnung liefert die richtigen Stichproben aus der Verteilung der Lösungen und charakterisiert somit die Verteilungen genauer.

Beide probabilistische Verfahren liefern durch gewichtete Mittelung der Spannungs-Dehnungskurve die Fehler der (neuronalen) Bestimmung der Spannungs-Dehnungskurve (oberes und unteres 90%-Konfidenzintervall).

Die Auswerteverfahren wurden für eine Reihe von Werkstoffen angewendet und mit Zugversuchen verifiziert. Für die Details bezüglich der Auswertemethoden sei auf [1] und für eine ausführliche Darstellung in der experimentellen Anwendung auf [2] verwiesen.

[1] E. Tyulyukovskiy and N. Huber: Identification of viscoplastic material parameters from spherical indentation data. Part I: Neural networks, J. Mater. Res 21, 664-676 (2006).

[2] D. Klötzer, Ch. Ullner, E. Tyulyukovskiy, N. Huber: Identification of viscoplastic material parameters from spherical indentation data. Part II: Experimental validation of the method, J. Mater. Res 21, 677-684 (2006).

Der Aufruf des Neuronale Netze Moduls erfolgt über die Schaltfläche ***Stress-strain***  im Hauptmenü.

Diese Schaltfläche ist nur aktiviert, wenn das Fenster **Averages Results** offen ist, d.h. wenn bereits korrigierte und gegebenenfalls gemittelte Messdaten vorliegen. Die Analyse schließt die Korrektur der Gerätesteifigkeit und optional eine Nullpunktskorrektur ein. Außerdem wird geprüft, ob der erforderliche Messablauf mit 3 kürzeren und einer langen Haltezeit realisiert wurde. Ohne den korrekten Belastungsverlauf wird die Nutzung des Moduls für diese Daten abgewiesen.

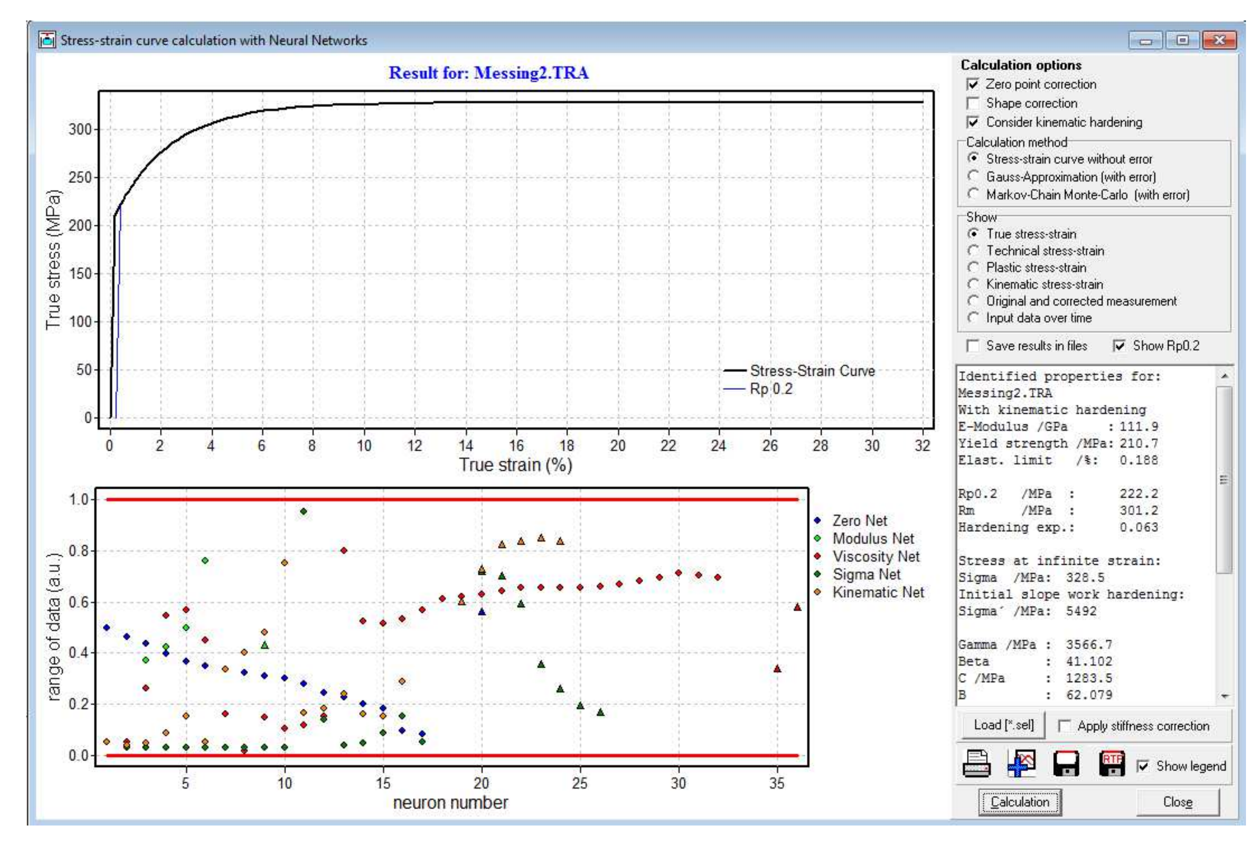


*Abb. 84: Das Fenster **Stress-Strain curve calculation** für die Ermittlung von Spannungs-Dehnungs-Kurven von Metallen aus Kugeleindrücken*

Für die durchzuführende Belastung muss folgendes beachtet werden (wie in den mitgelieferten Beispielen Brass_0001.tra und Brass_0002.tra):

1) Es gibt 4 zeitgleiche Phasen zur linearen Erhöhung der Belastung, so dass die **Eindringtiefe** des Kugelindenters nach der 4. Belastung **das 0,08 - 0,12 -fache des Indenterradius** beträgt. Auf diesen Bereich sind die Netze trainiert. Der Wert sollte möglichst genau bei 10% des Indenterradius liegen.
2) Zwischen den ersten 4 Belastungsphasen folgt eine 100s-Kriechphase bei konstanter Kraft.
3) Nach der 4. Belastungsphase folgt eine 600s-Kriechphase.
4) Abschließend wird der Indenter mit der gleichen Geschwindigkeit einmal vollständig entlastet und wieder bis über die letzte Belastungskraft erneut belastet.

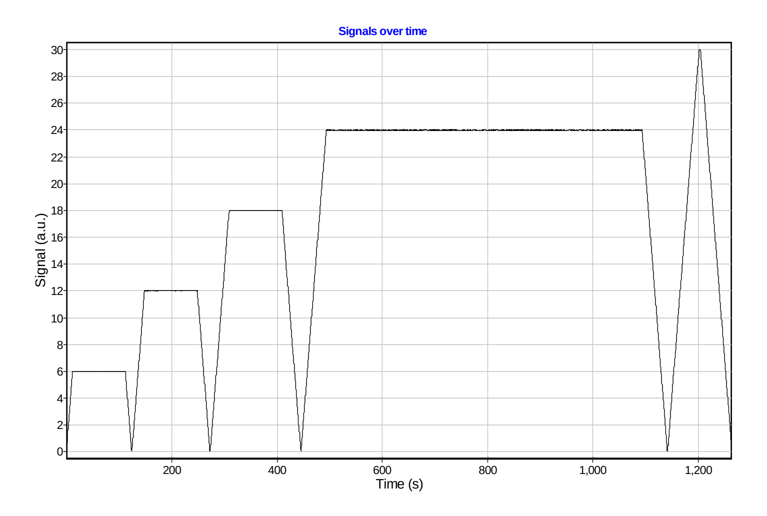


Abb. 85: Erforderlicher Messablauf als Kraft über Zeit. Die Entlastung in den ersten 3 Zyklen ist nicht unbedingt notwendig

Aus den Messdaten berechnet InspecorX oder IndentAnalyser automatisch die entsprechenden Netzeingangsdaten für die Neuronalen Netze. In der Konfiguration müssen die korrekten Werte für die Gerätesteifigkeit (Instrument stiffness) entweder als konstanter Wert oder als Funktion und die korrekte Flächenfunktion für den Kugelindenter, entweder als konstanter Radius oder als Funktion gespeichert sein. Ist dies nicht der Fall ergeben sich falsche Ergebnisse.

Calculation options

Zero point correction (Nullpunktskorrektur): Eine optimale Lage des Nullpunktes wird ebenfalls durch ein neuronales Netz bestimmt. Das Ergebnis kann etwas von der bereits im Programm implementierten Nullpunktskorrektur abweichen.

Shape corretion (Gestaltkorrektur): Ein neuronales Netz berücksichtigt die Auswirkungen einer nicht-idealen Kugelform auf die Last-Eindringtiefe Kurven und rechnet die Kurven entsprechend um. Dieses Netz funktioniert nur begrenzt.

Consider kinematic hardening (Berücksichtigung kinematischer Verfestigung): Ein neuronales Netz wertet nach dem kinematisches Verfestigungsmodell aus. Die entsprechenden Informationen werden aus der Hysterese der Be- und Entlastungskurve am Ende der Messung gewonnnen.

Calculation method

Die Berechnung erfolgt mit dem klassischen, dem Gauss- oder dem Markovmodell, wie oben erläutert. Die klassische NN-Berechnung ist die schnellste (< 1s), berechnet aber keine Fehlerkurven für die Spannungs-Dehnungskurve. Die beiden anderen Berechnungsmethoden liefern das richtige 90%-Konfidenzintervall benötigen aber teilweise mehr als 60 s für die Berechnung. Die einzelnen von 3^6=729 Schritten kann man verfolgen und die Berechnung jederzeit abbrechen. Nach Abbruch wird die letzte berechnete Spannungs-Dehnungskurve angezeigt.

Nach der Berechnung werden die ermittelten Spannungs-Dehnungskurven in der Grafik angezeigt.

Nur für die klassische Berechnungsmethode werden auch die Eingangs- und Ausgangsdaten bezüglich der Trainingsintervalle im Intervall von 0 bis 1 links unten gezeigt (untere Grafik in Abb. 84 mit roten Intervallgrenzen). Dies kann ebenfalls als Genauigkeitskriterium der Rechnung herangezogen werden. Die Netze werden innerhalb ihres Trainingsbereiches genutzt, wenn alle Punkte zwischen Null und Eins liegen. Wenn mehrere Punkte außerhalb des Intervalls liegen, ist dies ein Hinweis auf ungenügende Adaption durch die Netze.

In den Spannungs-Dehnungskurven wird bei Auswahl mit Häkchen die $R_{p,0,2}$-Gerade gezeigt (Gerade parallel zum elastischen Bereich und bei 0,2%-Dehnung an der Dehnungsachse). Ebenfalls durch Auswahl mit Häkchen können die formkorrigierten und unkorrigierten Kraft-Eindringtiefe-Kurven im Datenverzeichnis als ASCII-Files (*.gcr und *.ucr) gespeichert werden.

Rechts unten sind in einem Textfeld die ermittelten Materialparameter vollständig mit Einheiten aufgelistet. Sie können (z.B. mit Ctrl + C) in die Zwischenablage kopiert werden oder als RTF-File mit Hilfe der Schaltfläche RTF abgespeichert werden.

Alle Kurven in der oberen Grafik können wie üblich, ausgedruckt, ins Fenster **Comparison** kopiert oder als Textdateien exportiert werden.

Mit der Auswahl **Show** kann nach der Berechnung die Art der Kurvendarstellung ausgewählt werden:

- True stress-strain - Wahre Spannungs-Dehungs-Kurve
- Technical stress-strain - Technische Spannungs-Dehungs-Kurve
- Plastic stress-strain - plastischer Anteil an der Spannungs-Dehungs-Kurve
- Kinematic stress strain - Anteil der Kurve, der sich aus kinematischer Verfestigung ergibt.

- Original and corrected measurement- zeigt die originale und die Nullpunkt-korrigierte Messkurve mit ihren Stützstellen für die Berechnung an
- Input data over time - Zeigt die Messdaten über der Zeit an

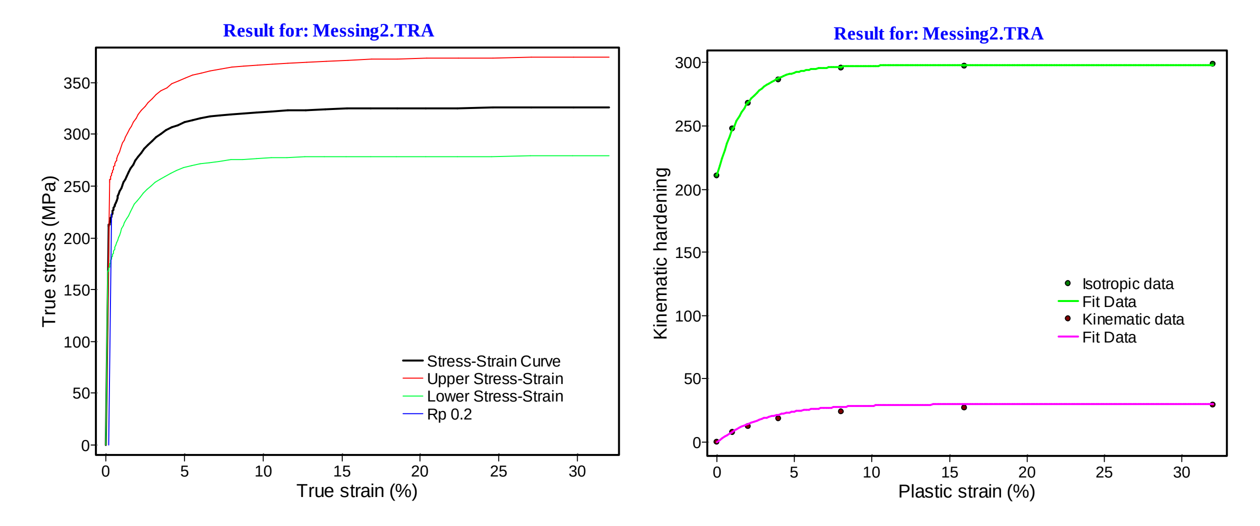


Abb. 86: Zwei Darstellungsvarianten im Neuronalen-Netz-Modul. Links die Berechnung mit Fehlergrenzen durch Markov-Ketten, rechts der Anteil der kinematischen Verfestigung.

5.8 Laterale Referenzmessungen

Um laterale Verschiebungen zu erzeugen, ist immer auch eine Kraft zur Deformation der Blattfedern der Lateralkrafteinheit erforderlich (laterale Federsteifigkeit). Diese Kraft wirkt zusätzlich zur Reibkraft zwischen Probe und Indenter und muss genau bekannt sein, um sie von der gemessenen Gesamtkraft abziehen zu können.

Bedingt durch die Konstruktion und die hohen Anforderungen an die normale Steifigkeit des Federsystems kann die Federkennlinie leicht nichtlinear sein. Zur Ermittlung der Federkennlinie wird vor Beginn von Lateralkraftmessungen eine Referenzmessung ohne Kontakt zwischen Probe und Indenter durchgeführt und unter der Dateiendung **.REF** abgespeichert (s. Abb. 87).

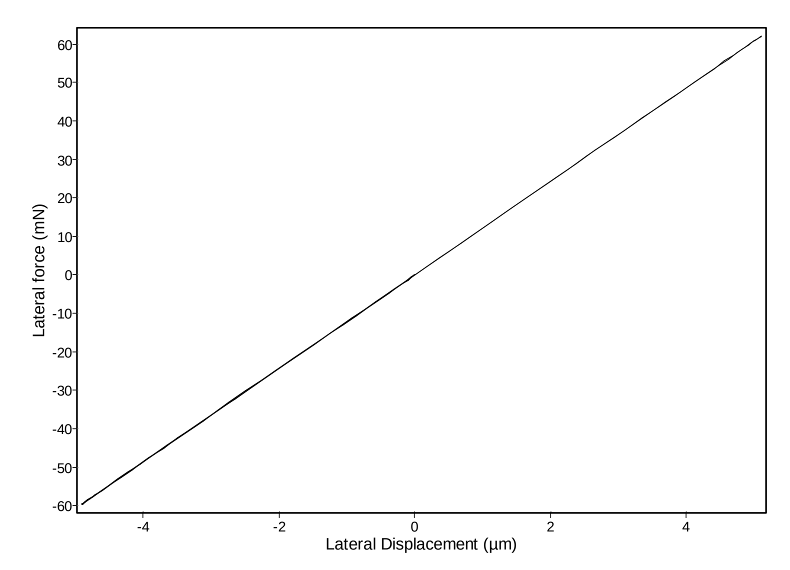


Abb. 87: Laterale Referenzmessung für einen Scratchtest mit Tischbewegung. Die Federkonstante beträgt 12,15mN/µm

Seit IndentAnalyser Version 3 werden diese Daten mit im Datenfile der eigentlichen Messung gespeichert, so dass die REF-Files nicht mehr für die Auswertung benötigt werden. Es ist trotzdem sinnvoll sie zu behalten, um später einen einfachen Vergleich dieser Referenzmessungen zu ermöglichen.

Die Messparameter und der Verschiebungsbereich für die Referenzmessung werden automatisch gewählt. Als Dateiname wird der gewählte Datenfilename der ersten normalen Messung verwendet

Die REF-Files können genauso wie normale Datenfiles über die ***Open*** Schaltfläche gelesen werden.

Zu einer lateralen Referenzmessung gehören mindestens eine Hin- und Rückbewegung, meist jedoch zwei. Die maximale Auslenkung wird durch die Auslenkung festgelegt, die für die nachfolgenden Messungen programmiert wurde. Die Auslenkung während einer Referenzmessung ist immer etwas größer als die größte Auslenkung der programmierten Applikation. Bei Scratchtests mit Tischbewegung beträgt die Auslenkung nur etwa +/- 5µm da sich dort nur der Tisch bewegt und die Position der LFU annähernd bei Null gehalten wird.

5.9 Auswertung von Scratchtests

Scratchtests können auch ohne Lateralkrafteinheit durchgeführt werden. Allerdings können dann keine lateralen Kräfte und damit auch keine Reibwerte gemessen werden.

Die bevorzugte Scratchtestmethode ist die Messung mit Tischbewegung, da dort längere Scratchtests gemacht werden können, so dass sich die Schäden über einen größeren Probenbereich verteilen und besser identifiziert werden können.

Wird sehr hohe laterale Auflösung benötigt oder steht nur ein kleines Probenvolumen zur Verfügung, ist die Messung mit LFFU zu bevorzugen.

Nach Abschluss einer Messung oder nach Einlesen eines Datenfiles mit Scratchdaten öffnet sich im Fenster **Measurement data** automatisch die Seite **Scratch**.

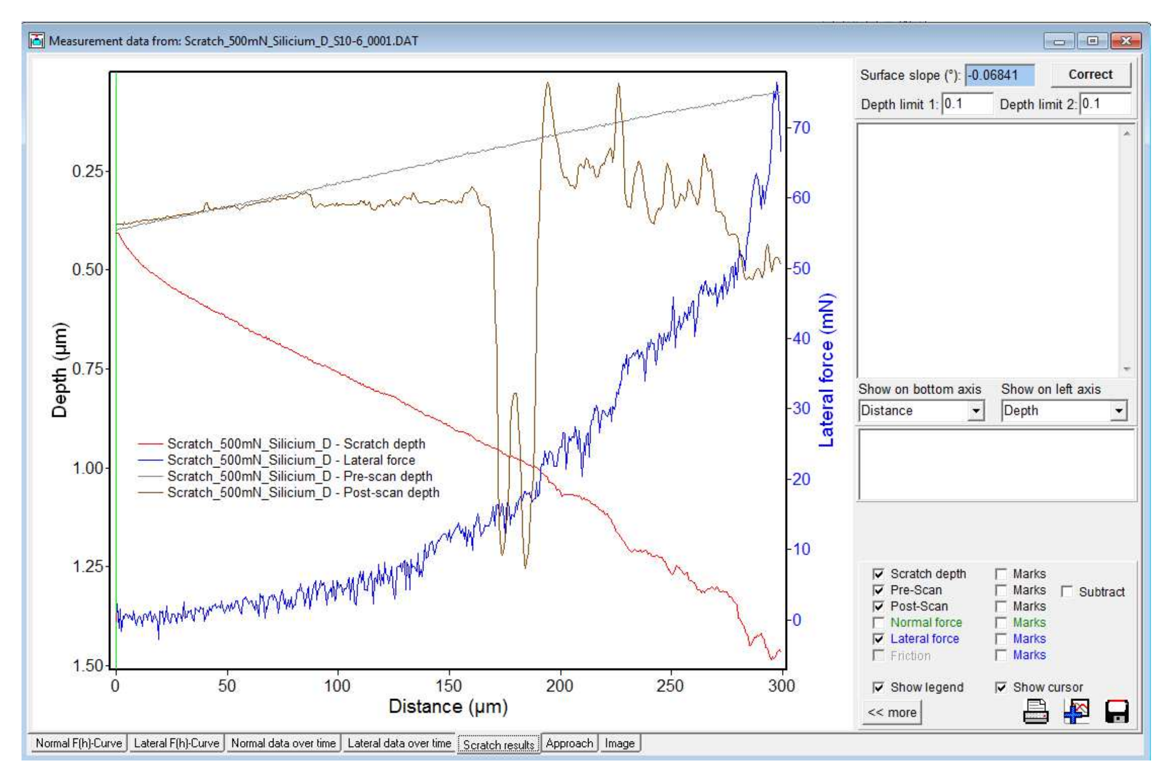


*Abb. 88: Die Seite **Scratch** im Fenster **Measurement data** vor dem Ausgleichen der Oberflächenneigung*

Sofern ein Pre-Scan der Oberfläche durchgeführt wurde oder bei Scratchtests mit konstanter Kraft wird die Probenneigung in Scratchrichtung berechnet und rechts oben unter **Surface slope (°)** angezeigt. Mit der Schaltfläche **Correkt** wird die Probenneigung ausgeglichen. Erst danach werden Daten im Textfeld rechts angegeben.

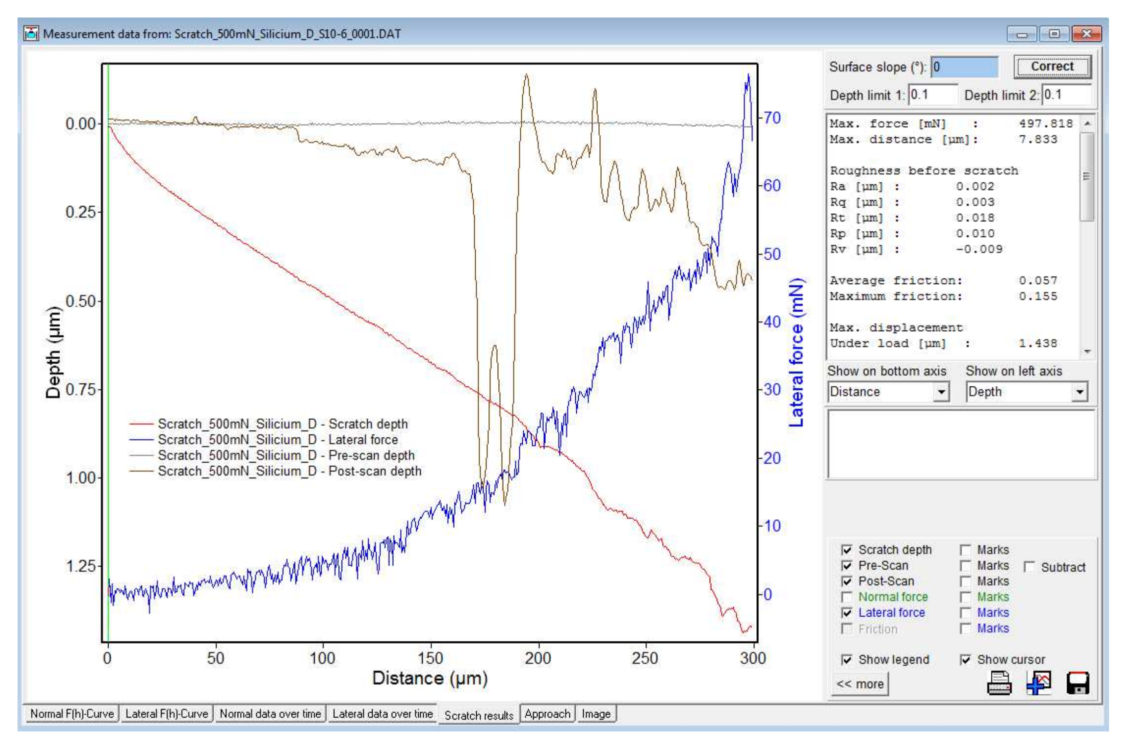


*Abb. 89: Die Seite **Scratch** im Fenster **Measurement data** nach Ausgleichen der Oberflächenneigung*

In dem Auswertefenster sind standardmäßig zunächst 3 Kurven zu sehen.

Scratch depth: zeigt die Eindringtiefe während des Scratchtests unter Last. Diese Kurve enthält auch die elastischen Deformationsanteile.

Pre-scan depth: gibt die Form der Oberfläche vor dem Scratchtest an. Bei Messungen mit LFU ist dies der Mittelwert aus einem Hin- und Zurück-Scan.

Post-scan depth: wird durch einen Scan mit geringer Kontaktkraft nach dem Scratchtest ermittelt und gibt die tatsächliche Schädigungstiefe der Oberfläche an. Diese Tiefe kann allerdings durch anhaftendes Material an der Messspitze oder durch abgelagertes Material in der Scratchspur verfälscht werden und ist eventuell im optischen Bild zu prüfen.

Allen drei Kurven sind der linken Achse (Depth) zugeordnet.

Lateral force: zeigt die gemessene Lateralkraft an und ist der rechten Achse zugeordnet.

Friction coefficient: Anstelle der Lateralkraft kann der Reibwert angezeigt werden. Dazu ist das Häkchen bei Lateral force zu entfernen und anschließend bei **Friction coefficient** zu setzen (lateral force und friction coefficient können nicht gleichzeitig angezeigt werden).

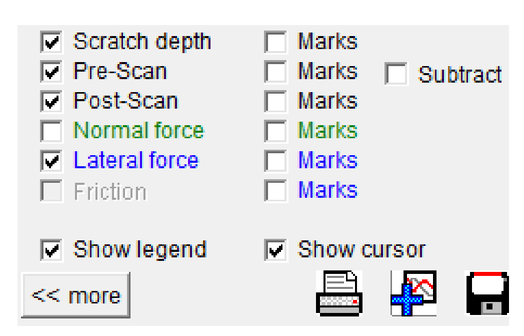
In der Grafik eine senkrechte grüne Linie zu sehen, die durch Halten der linken Maustaste und Ziehen der Maus verschoben werden kann. Mit ihr ist manuell die Stelle festzulegen bei der eine Schädigung der Probe identifiziert wird oder an der die Schicht abplatzt. Es kann vorkommen, dass eine kritische Last nicht definiert werden kann, weil es keinen deutlichen Sprung oder Knick in den Kurven gibt. Es ist vorteilhaft, die Schäden auch im optischen Bild zu prüfen.

Im Ausgabefeld rechts unten werden die Werte für die Position der grünen Zeigers ausgegeben.

X [µm] – Position entlang der Scratch-Achse mit Null als Startpunkt
hm [µm] – Tiefe unter Last (Maximaltiefe)
Fn [mN] – Normalkraft

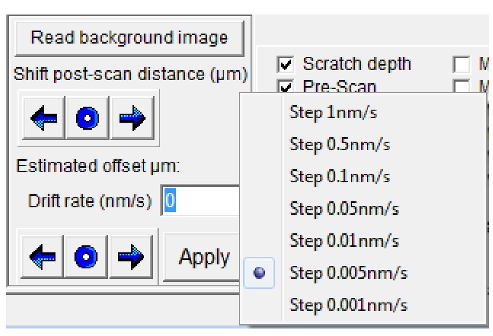
Fl [mN] – Lateralkraft
µ – Reibwert

Die Werte in diesem Feld können durch Kopieren und Einfügen in andere Programme übernommen werden.



Durch Setzen der einzelnen Häkchen können die Kurven an- oder ausgeschaltet oder Punktmarken gesetzt werden.

Mit **Subtract** wird die Pre-Scan-Kurve (sofern vorhanden) von den anderen Tiefenkurven abgezogen. Damit kann der Einfluss der Oberflächenrauheit etwas reduziert werden. Aus einem Peak an der Oberfläche wird dadurch ein Tal in den anderen Kurven.



Da auch während eines Scratchtest thermische Drift auftritt und die Messzeit oft 100 s oder mehr beträgt, ist für eine genaue Auswertung die thermische Drift zu korrigieren. Mit der Schaltfläche **More** kann hierzu ein weiteres Fenster geöffnet werden.

Mit den beiden unteren Pfeiltasten kann eine Driftrate erzeugt und auf die Messkurven angewendet werden. Als Kriterium für die beste Korrektur kann gelten, dass die Pre- und Post-Scan Kurven am Beginn (bei kleinster Kraft) etwa übereinander liegen sollten. Hierzu ist es sinnvoll den Kurvenbereich etwas heraus zu zoomen (s. Abb. 90 gegenüber Abb. 89). Die Driftrate im Beispiel betrug 0,18nm/s.

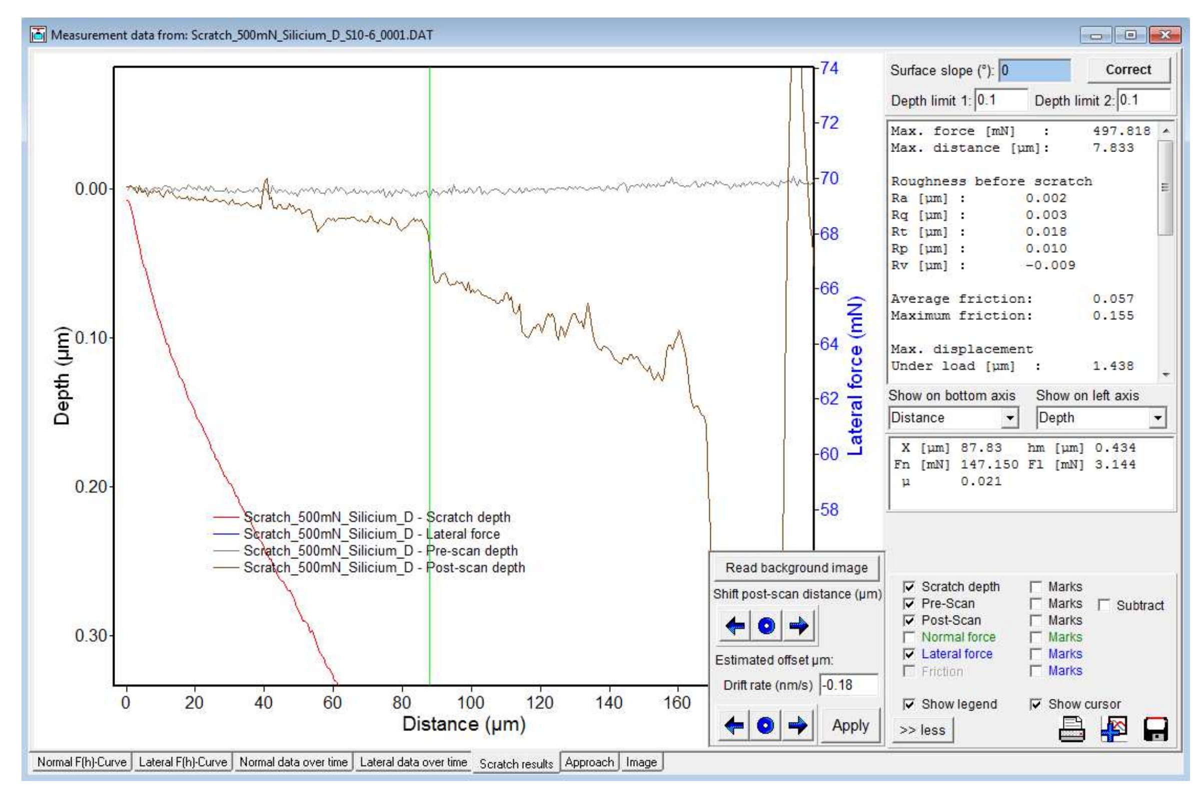


*Abb. 90: Die Seite **Scratch** im Fenster **Measurement data** nach Ausgleichen der thermischen Drift*

Mit einem rechten Mausklick über dem Driftraten-Feld kann die Schrittweite der Drift-Schritte verändert werden. Mit den oberen Pfeiltasten lassen sich die Kurven seitlich gegeneinander verschieben um gegebenenfalls eine bessere laterale Übereinstimmung zu erreichen.

Mit **Read background image** kann ein Bild der Scratchspur hinter die Kurve gelegt werden. Dabei ist zu beachten das Bildmaßstab und Kurvenmaßstab nicht übereinstimmen. Oft kann auch nicht die gesamte Scratchspur in einem Bild abgebildet werden.

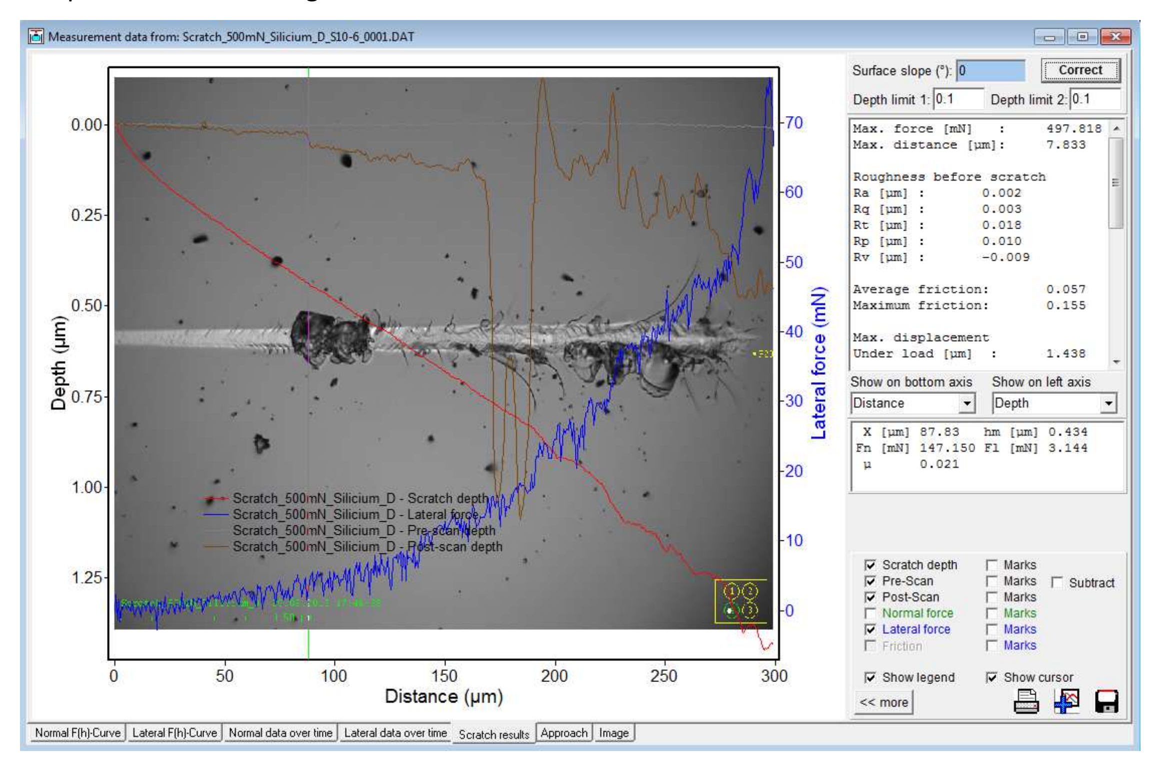


*Abb. 91: Die Seite **Scratch** im Fenster **Measurement data** nach Einlesen eines Hintergrundbildes*

In der Konfiguration können 2 Limits für die Tiefe der Scratchkurven eingegeben werden (s. Abschnitt 3.3.6). Sie lassen sich auf der Scratchseite ändern. Die Position und die Kraftwerte, an denen diese Limits überschritten werden, werden im Textfeld angegeben.

Alle Ergebnisse, die im Textfeld zu finden sind, werden auch in der Ergebnistabelle angezeigt, so dass man nacheinander verschiedene Tests auswerten und die Ergebnisse sammeln kann. Ein Mischen der Auswertung von Scratchtests mit der Auswertung von Härtemessungen ist nicht möglich.

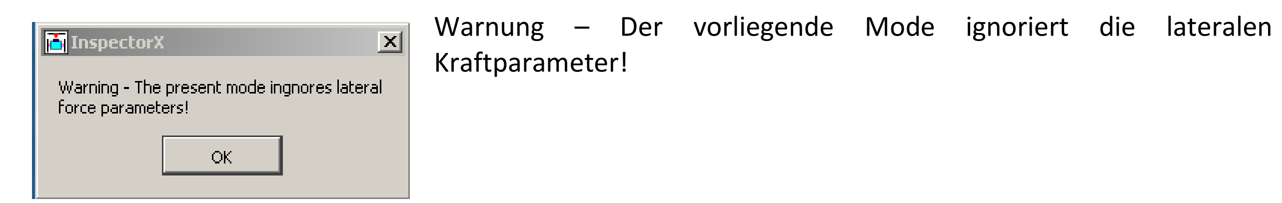
5.10 Auswertung von Reibungs- und Verschleißtests

Die Durchführung von Reibungs- und Verschleißtests setzt die Lateralkrafteinheit voraus. Die Auswertung eines Verschließtests erfordert den Mode (nur UNAT)

Normal indentation
Normal + lateral indentation

Normal + lateral indentation im Hauptmenü.

Andernfalls wird die folgende Nachricht im Mode Normal indentation angezeigt:



Warnung – Der vorliegende Mode ignoriert die lateralen Kraftparameter!

Ein Verschleißtest besteht aus wenigen bis mehreren hundert Zyklen mit gleichen Parametern und erfordert deshalb meist eine lange Messzeit. Dies macht eine genaue thermische Driftkorrektur notwendig. Am Ende des Messzyklus ist eine Haltezeit zur Bestimmung der thermischen Drift

erforderlich. Die Driftrate muss jedoch auch über lange Zeiträume konstant sein, was aber nicht immer gewährleistet werden kann. Daher sind Messungen über einer Stunde für die Auswertung der Tiefenwerte nicht zu empfehlen. Auf Messungen des Reibwertes hat dies jedoch keinen Einfluss.

Nach dem Beenden der Messung oder dem Einlesen eines Datenfiles werden die Lateralkurven im Fenster **Measurement data** auf der Seite **Lateral F(h)-Curve** dargestellt.

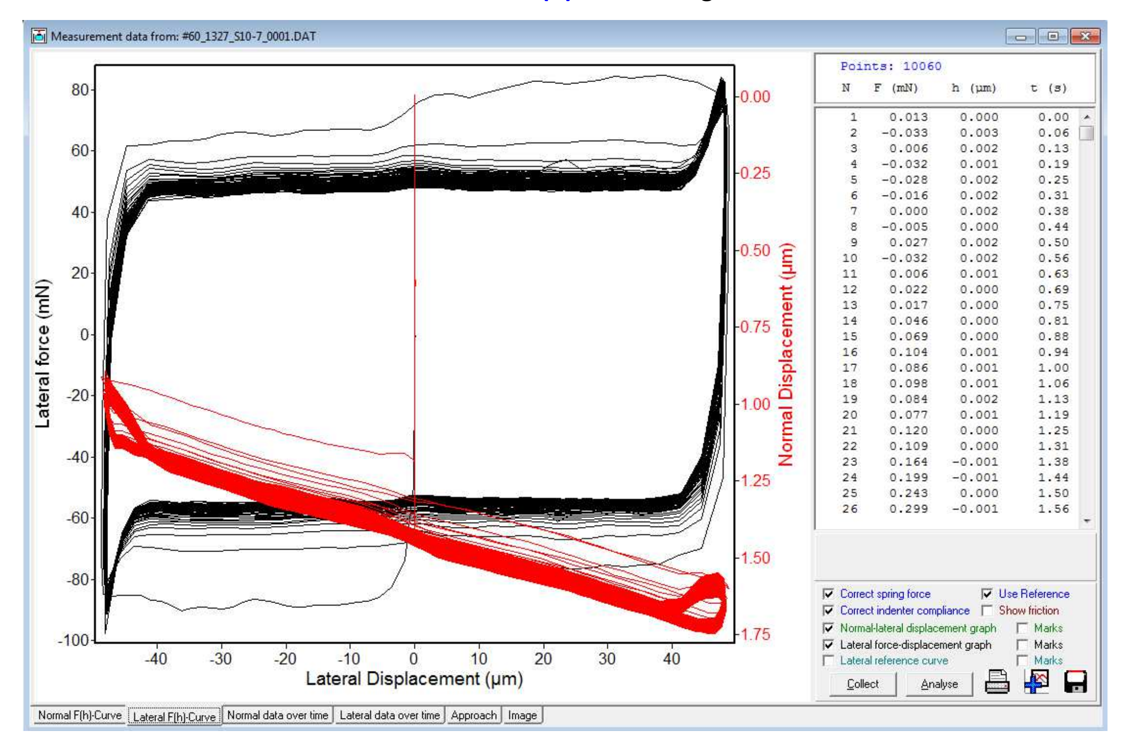


*Abb. 92: Die Seite **Lateral F(h)-Curve** im Fenster **Measurement data** nach Einlesen eines Verschleißtest*

Bevor die Lateraldaten ausgewertet werden, muss die Nullpunktkorrektur und die thermische Driftkorrektur durchgeführt werden unter Verwendung der Kraft-Verschiebungs-Daten in Normalrichtung. Dazu kann die **Analysis** Schaltfläche im Hauptmenü gedrückt werden oder man muss zur Seite **Normal F(h)-Curve** wechseln und dort die Schaltfläche ***Analyse*** drücken. Nach der Korrektur wird sich auch der Verlauf der Kurven im Fenster **Measurement data** ändern. Die Kurve von Abb. 92 wird nach der Driftkorrektur aussehen wie in der rechten Abb. 93 unten.

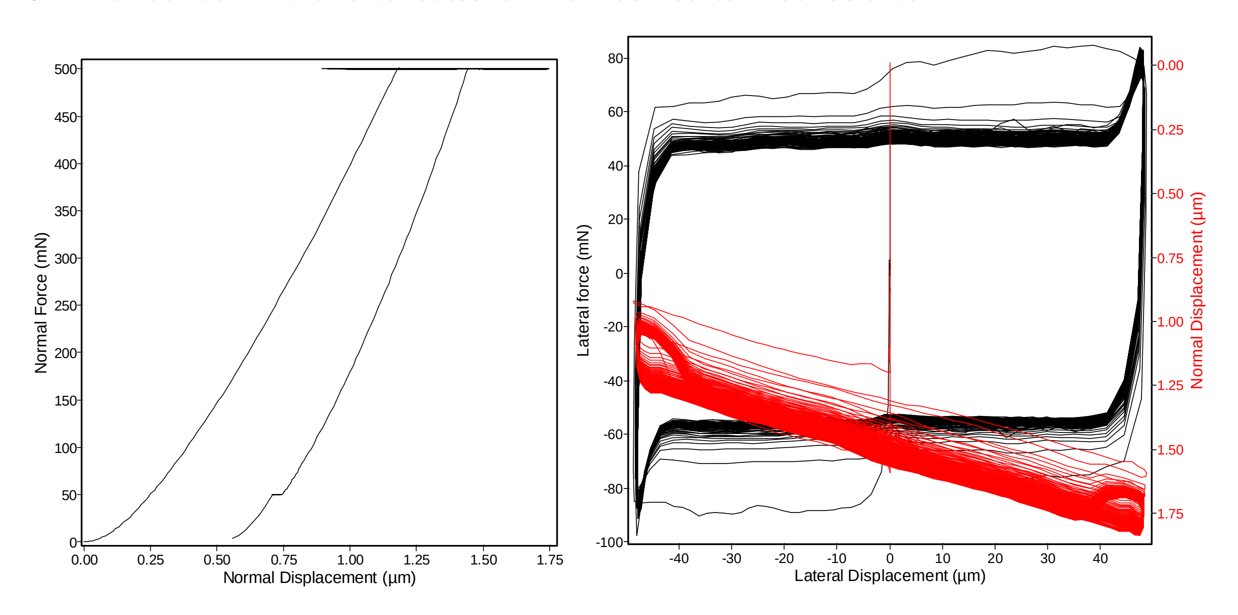


Abb. 93: Normale (links) und laterale (rechts) Kraft-Verschiebungs-Kurve nach Korrektur der thermischen Drift

Die linke Abbildung zeigt die normale Kraft-Verschiebungs-Kurve. Die große Tiefenänderung bei Maximalkraft wird durch die Oberflächenneigung der Probe verursacht. An der lateralen Kurve (rot) in der rechten Abbildung ist deutlich zu erkennen, dass die Oberfläche nicht völlig horizontal war.

Eine weitere Auswertung kann nun durchgeführt werden durch Drücken der Schaltfläche ***Analyse*** auf der Seite **Lateral F(h)-Curve**.

Das Fenster **Lateral Data analysis** öffnet sich und zeigt den zweiten Lateralkraft-Verschiebungs-Zyklus.

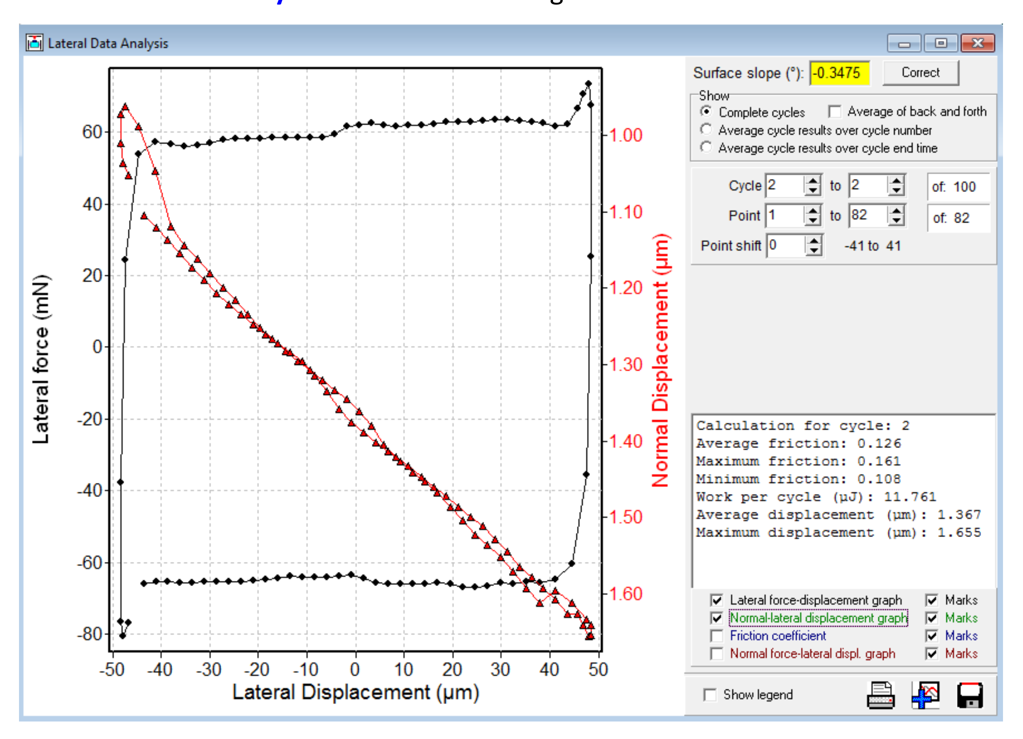


Abb. 94: Das Fenster Lateral Data Analysis mit den Daten für den zweiten Zyklus

Das gelbe Feld rechts oben im Auswertefenster zeigt die Oberflächenneigung an. Sie kann durch Drücken der Schaltfläche ***Correct*** korrigiert werden. Dies ändert die Kurven sowohl im Fenster **Measurement data** als auch im Fenster **Lateral Data Analysis**.

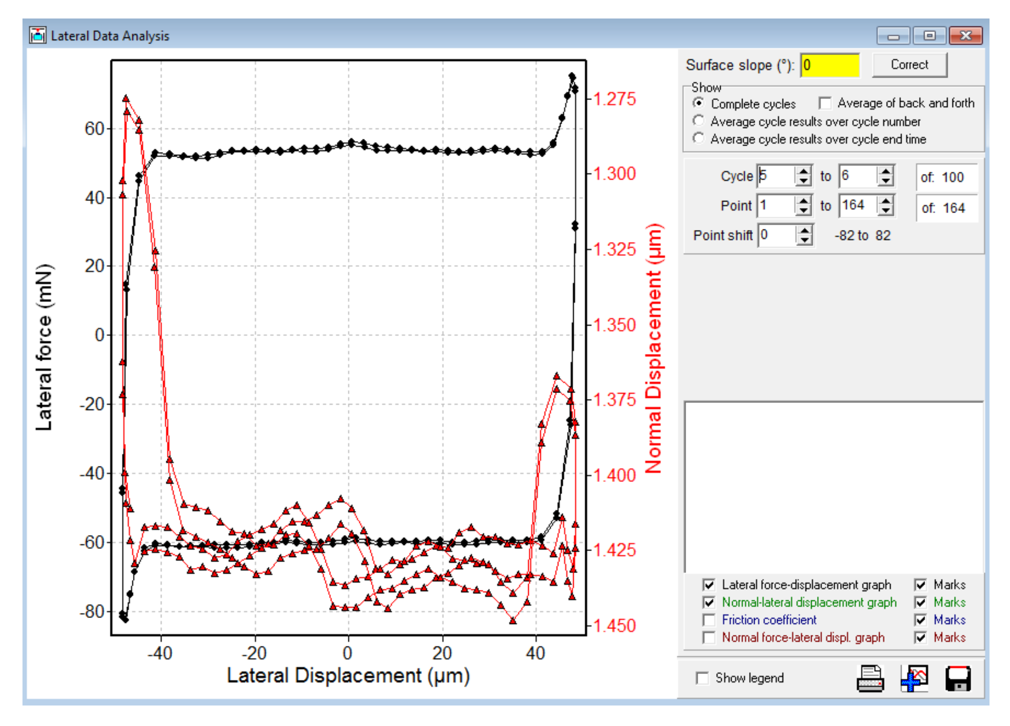


Abb. 95: Das Fenster Lateral Data Analysis mit den Daten von zwei Zyklus nach der Neigungskorrektur

Das Fenster **Lateral Data Analysis** ermöglicht eine detailliertere Analyse jedes einzelnen Zyklus als auch die Darstellung der gemittelten Ergebnisse über der Zyklenzahl oder der Zeit.

Durch Ändern der Zahlen in den Feldern **Cycle to** kann zwischen den einzelnen Zyklen gewechselt werden. Wenn die Zahl im linken Cylce-Feld die des rechten Feldes erreicht, wird die Zahl im rechten Feld automatisch erhöht und es wird nur ein Zyklus angezeigt. Wenn die Zahl im rechten Feld höher ist, wird mehr als ein Zyklus dargestellt. Dasselbe Prinzip gilt, wenn die Zahl im rechten Zyklenfeld verringert wird.

Der Start- und der Endpunkt eines Zyklus kann mit den Punktfeldern unter den Cycle-Feldern beeinflusst werden.

Nach dem ersten Klicken der Schaltfläche ***Average cycle results*** des *Show*-Feldes wird eine Berechnung der Mittelwerte für alle Zyklen starten. Dies kann einige Zeit in Anspruch nehmen. Die Ergebnisse werden abgespeichert und ein weiterer Klick auf die Radio-Schaltfläche wird die Berechnung **nicht** wiederholen.

Nach der Berechnung zeigt ein neues Diagramm die mittlere Reibung über der Zyklenzahl und neue Kontrollkästchen erscheinen auf der rechten Fensterseite. Sie gestatten es folgendes anzuzeigen:

- Mittlere, maximale und minimale Reibung über der Zyklenzahl oder der Zeit
- Mittlere, maximale und minimale Eindringtiefe über der Zyklenzahl oder der Zeit
- Arbeit pro Zyklus über der Zyklenzahl oder der Zeit

Beide vertikalen Achsen des Diagramms werden zur Darstellung verwendet. Die schwarze Achse gehört zur schwarzen Kurve und umgekehrt.

Mit **Start at Zero** neben Average displacement wird die Darstellung der mittleren Eindringtiefe bei Null gestartet. Dadurch lassen sich mehrere Kurven besser vergleichen.

Der Anstieg der mittleren Tiefenänderung über der Zyklenzahl entspricht einem Verschleißkoeffizienten und kann in nm/Zyklus angegeben werden. Dafür kann das Fitfenster verwendet werden. Mit diesem Messverfahren ist es möglich noch Tiefenänderungen von 0,1nm/Zyklus aufzulösen.

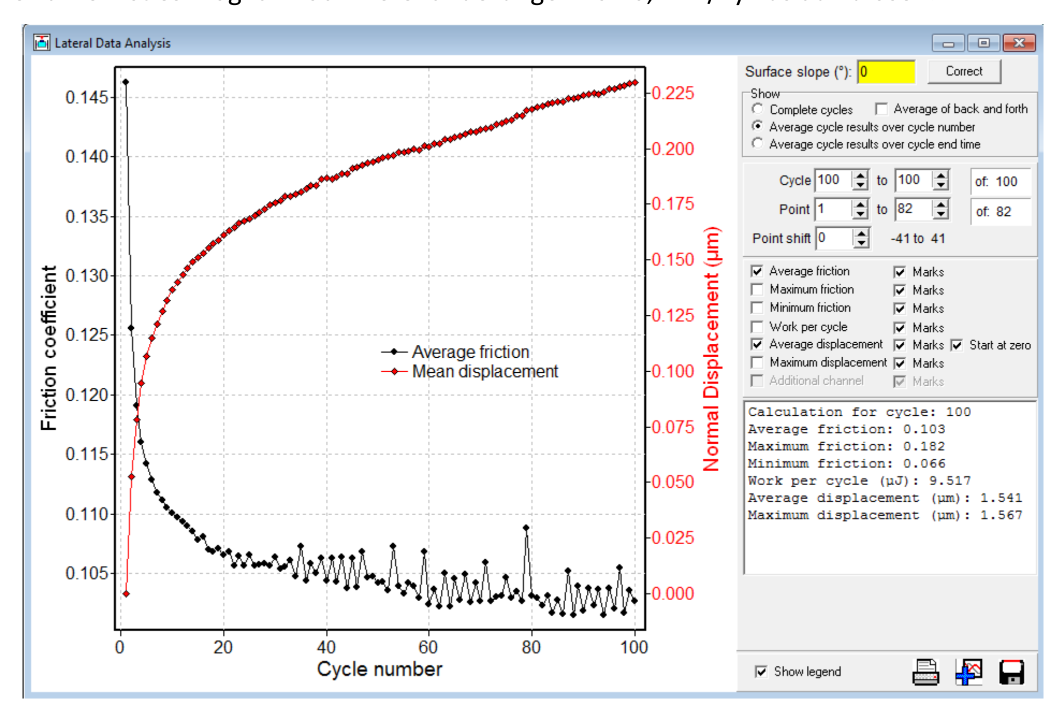


Abb. 96: Das Fenster Lateral Data Analysis mit den mittleren Werten für Reibwert und Verschleißtiefe über der Zyklennummer

5.11 Auswertung von Zugversuchen

Die Auswertung von Zugversuchen erfolgt im Fenster **Measurement data**. Nach Einlesen eines Datenfiles werden die Kurven dort angezeigt.

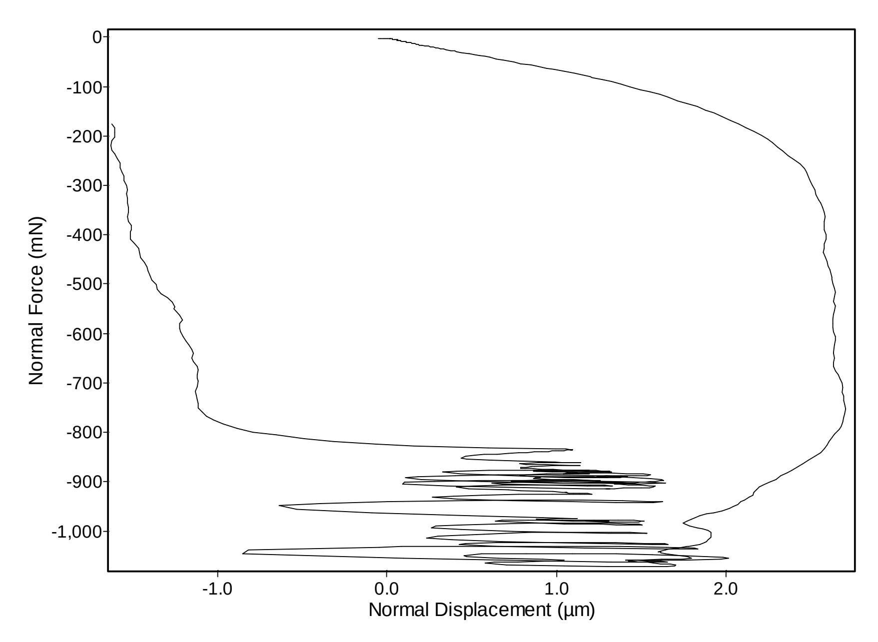


Abb. 97: Beispiel für die Anzeige auf der Seite Normal F(h)-Curve im Fesnter Measurement data während der Messung

Bei Messungen unter Verwendung des Z-Tischs ist während der Messung nur das Wegsignal des Messkopfes zu sehen, dass annähernd auf Null geregelt wird. Die verbleibende Auslenkung wird später zu der Z-Tischbewegung hinzugerechnet. Diese Kurve ist nicht informativ. Erst nach Abschluss der Messungen kann eine sinnvolle Kurve angezeigt werden, die auf der Displacement Achse auch die Tischbewegung des Z-Tisch berücksichtigt.

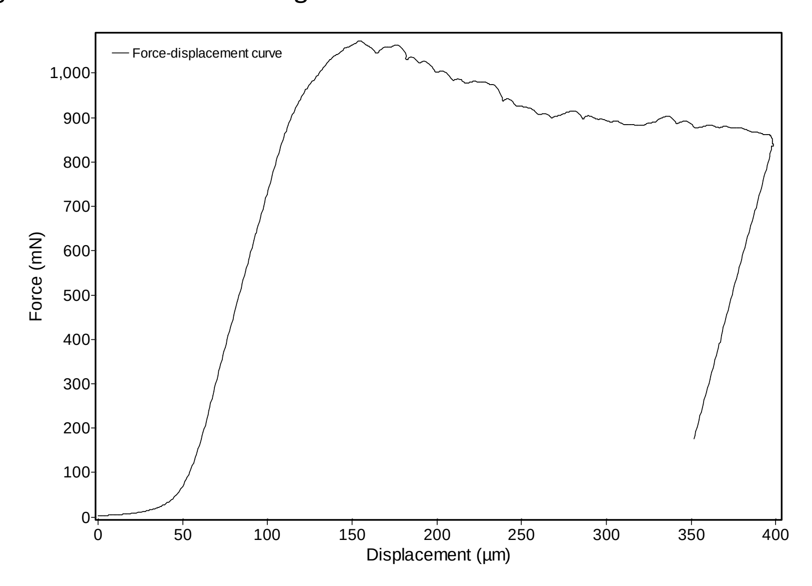


Abb. 98: Komplette Kraft-Verschiebungs-Kurve nach einem Zugversuch mit Z-Tisch an einem dünnen Metalldraht

In diesem Beispiel wurde nach Erreichen des programmierten Maximalweges die Position für 5 s gehalten und dann 5 s entlastet. Der Draht war während des Versuchs nicht gerissen. Die Entlastung ist

rein elastisch. Zu Beginn der Messung wird der Draht zunächst gerade gezogen so dass der eigentliche Nullpunkt verschoben ist.

Bei Kenntnis der Querschnittsfläche des Drahtes und Eingabe in das Feld **Sample cross section** kann die technische oder wahre Spannungs-Dehnungs-Kurve sofort ausgewertet werden. Die Messlänge (**Sample length**) wird automatisch mit Hilfe der Approach-Position und der Z-Tischkoordinate bestimmt und angezeigt. Eine automatische Berechnung des E-Moduls ist für zukünftige Softwareversionen vorgesehen.

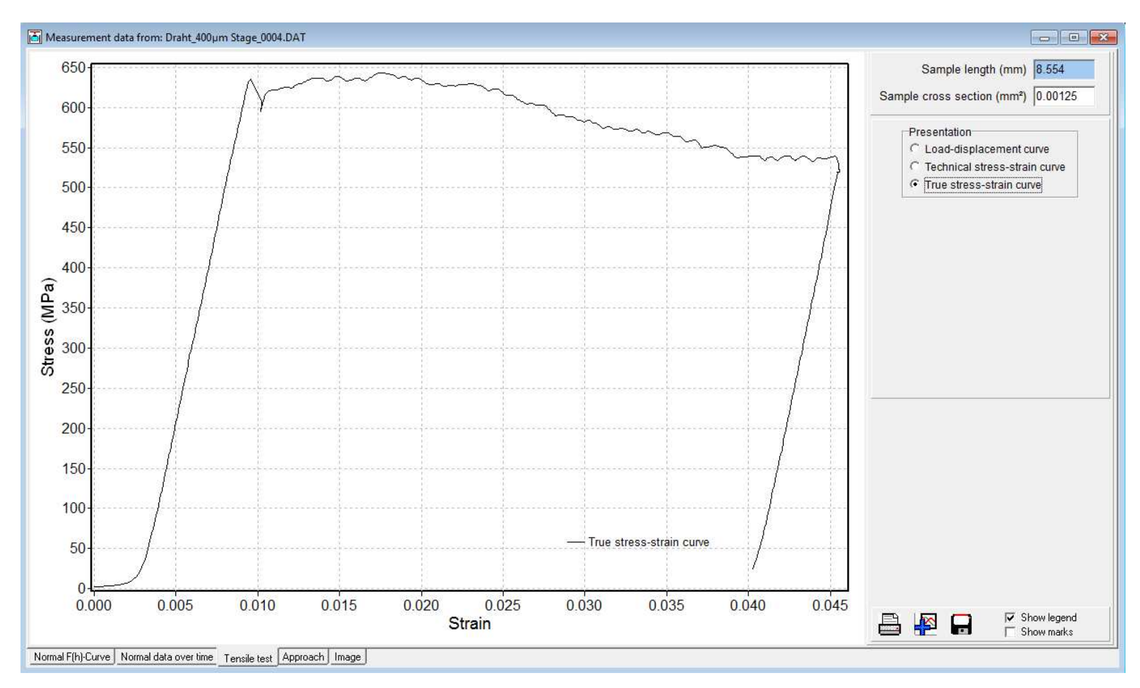


Abb. 99: Wahre Spannungs-Dehnungs-Kurve für den obigen Test

5.12 Das Scan Modul

Das **Surface Scan** Modul erlaubt das Scannen der Oberfläche mit folgenden Scan Modi:

X line scan with piezo – Linien-Scan in X-Richtung mit Hilfe der LFU (sofern vorhanden)
X line scan with stage – Linien-Scan in X-Richtung mit Hilfe des X-Tisch
Y line scan with stage – Linien-Scan in Y-Richtung mit Hilfe des Y-Tisch
Area scan with piezo and Y stage – Scan mehrerer Linien in X-Richtung mit LFU (sofern vorhanden) und schrittweiser Verschiebung in Y-Richtung mit Y-Tisch
Area scan with stages – Scan mehrerer Linien in X-Richtung und schrittweiser Verschiebung in Y-Richtung mit dem Tischsystem

Das Fenster öffnet sich automatisch, wenn ein zuvor abgespeichertes Scan-Datenfile mit der Endung SCN geöffnet wird. Es werden die Messparameter der Messung in den entsprechenden Feldern angezeigt.

Contact force: Kontaktkraft für den Scan.

Scan length in X: Länge des Scans. Jeder Scan wird so ausgeführt, dass sich die aktuelle Position (die Tischposition zum Zeitpunkt der Definition des Scans) in der Mitte der Scanlänge befindet. Dazu bewegt sich die Probe zunächst um die Hälfte der Scanlänge zur Seite, bevor der Scan gestartet wird. Die Maximallänge des Scans hängt vom Scan Modus ab. Beim Scan mit LFU beträgt sie maximal 150µm.

Scan length in Y: Bei Flächen-Scans wird hier der Abstand der ersten und der letzten Linie angegeben.

Number of lines: Dieses Feld ist nur bei Flächen-Scans verfügbar. Da die Scanzeit für einen Scan mindestens im Bereich von 10s liegen sollte, kann die Messzeit für viele Scans recht groß werden. Daher werden in der aktuellen Software nicht mehr als 21 Linien zugelassen. Es ist nicht möglich, das Gerät wie ein AFM zu verwenden, bei dem für eine Bild mindestens 128 Linien gescannt werden sollten.

Offset: Der Offsetbereich liegt auf beiden Seiten außerhalb der Scanlänge und wird verwendet, um die Kraft auf die Scankraft zu erhöhen bzw. am anderen Ende wieder abzusenken. Er sollte etwa 5% der Scanlänge betragen. Die abgefahrene Strecke ist dann 10% länger als die gemessene Strecke.

Scan time per line: definiert die Geschwindigkeit des Scans. Bei einem Scan mit Tischbewegung sollte sie beim UNAT nicht unter 5µm/s liegen.

Data rate: Die Standard-Datenrate beträgt 16 Hz. Bei schnellen Scans ist es sinnvoll, sie auf 64 Hz zu erhöhen.

Scan direction: Es kann ausgewählt werden, ob von links nach rechts (von oben nach unten bei Scan in Y-Richtung) oder umgekehrt gescannt werden soll. Dies kann bei größeren Stufen von Bedeutung sein. Es ist günstiger Stufen von unten nach oben zu scannen, als umgekehrt.

Aus den einzelnen Parametern ergibt sich die Zahl der Datenpunkte (*Absolute points*) und die Scanzeit (*Absolute scan time*). Diese Werte können nicht geändert werden und sind nur zur Anzeige da. Bei der Scanzeit wird auch die Zeit für die Bewegung zwischen den Zeilen berücksichtigt.

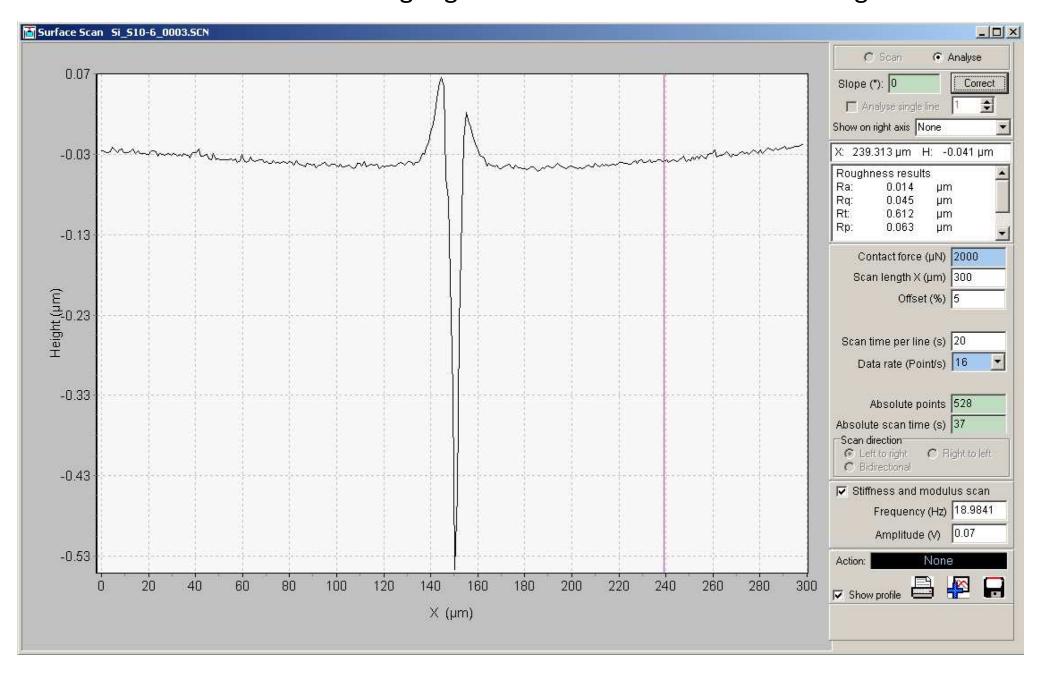


*Abb. 100: Das Fenster **Surface Scan** mit einem Linienscan durch einen Härteeindruck*

Die berechnete Probenneigung wird im Feld **Slope** angezeigt. Durch Drücken von **Correct** kann sie korrigiert werden. Die Probenneigung wird durch einen linearen Fit durch alle Messwerte bestimmt. In der aktuellen Version ist es nicht möglich, selbst die Punkte zu definieren, anhand derer die Messkurve ausgerichtet werden soll.

Sobald die Ausrichtung erfolgte, werden die ermittelten Rauheitsparameter angezeigt.

Ra – Arithmetischer Mittelwert der Profilkoordinaten
Rq – Quadratischer Mittelwert der Profilkoordinaten
Rp – Höhe der größten Profilspitze
Rv – Tiefe des größten Profiltales
Rt – Abstand zwischen Rp and Rv

Nach einem Flächen-Scan werden die Daten als Contour-Plot dargestellt (s. Abb. 101).

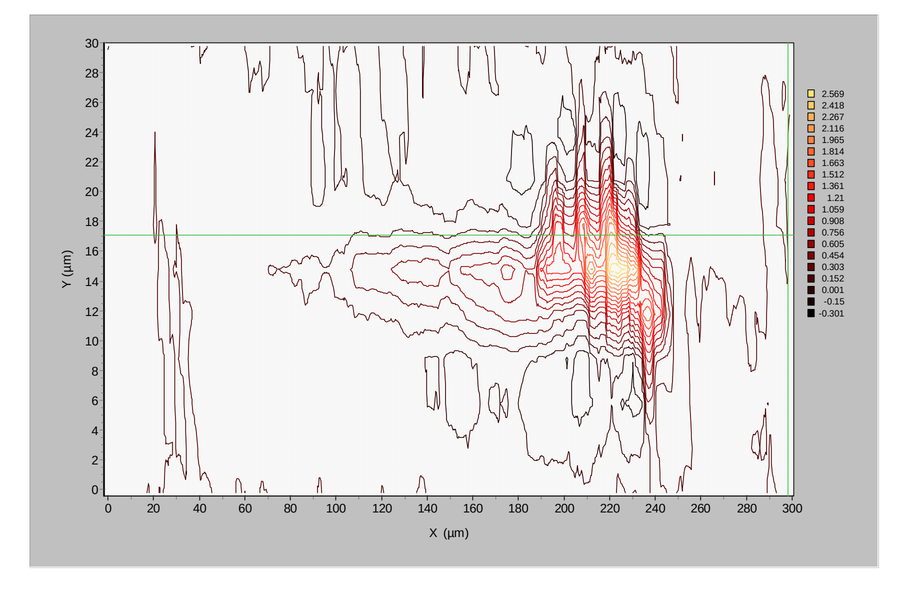


Abb. 101: Contour-Plot eines Flächen-Scans mit 11 Linien über die Spur eines Scratchtests

Durch Setzen eines Häkchens bei der 3D-Schaltfläche kann in eine 3D-Darstellung umgeschaltet werden.

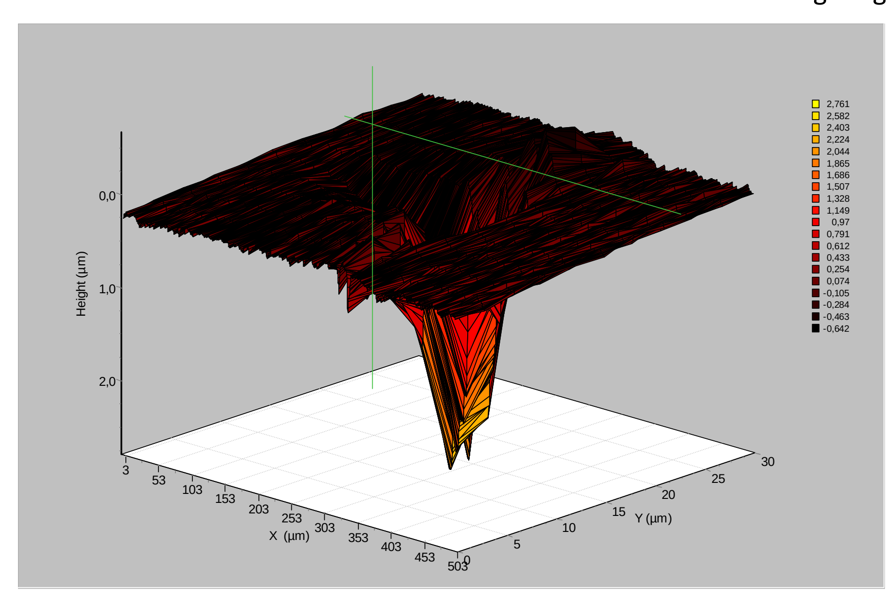


Abb. 102: 3D-Darstellung eines Flächen-Scans mit 11 Linien über die Spur eines Scratchtest

6 Bestimmung von Flächenfunktion und Gerätesteifigkeit

6.1 Berechnung aus plastischen Eindrücken (spitze Indenter)

6.1.1 Erster Schritt: Messung von Referenzmaterialien

Die Flächenfunktion des Indenters wird durch Messungen an einem Referenzmaterial mit hoher Homogenität und genau bekannten elastischen Eigenschaften durchgeführt. Soll gleichzeitig die

Gerätesteifigkeit bestimmt werden, sind Messungen an einem zweiten Material mit deutlich anderem E-Modul notwendig.

Ideale Referenzmaterialien sollten folgenden Anforderungen genügen:

- Homogenität der mechanischen Eigenschaften
- elastisch-plastische Isotropie
- Stabilität der mechanischen Eigenschaften über die Gebrauchsdauer
- keine merkliche Bildung von Oberflächenschichten (beispielsweise Oxide)
- glatte und saubere Oberfläche (sehr kleine Rauigkeit)
- keine oder möglichst geringe Kaltverfestigung (pile-up- oder sink- in-Effekte)
- keine oder reduzierte Rissentwicklung während des Eindrucks
- geeignete Werte von Härte und E-Modul.

Es wird empfohlen, Quarzglas zur Ermittlung der Flächenfunktion und Saphir oder ein anderes Material mit großem Elastizitätsmodul zur Bestimmung der Gerätesteifigkeit zu verwenden.

Die Bestimmung der Flächenfunktion sollte so genau wie möglich und über den gesamten Lastbereich des Gerätes erfolgen. Daher sollten wenigstens 10 Messungen pro Last durchgeführt werden. Bei Lasten über 100mN reichen auch 5 Messungen. Für die Berechnung der Flächenfunktion wird neben der maximalen Kraft und Eindringtiefe auch die Kontaktsteifigkeit benötigt. Die Messungen müssen aus Belastungs-, Kriech- und Entlastungssegment bestehen. Zyklische Messungen mit zunehmenden Laststufen sind auch möglich. Dies wird jedoch nicht empfohlen, da sie wegen einer längeren Messdauer und Driftproblemen oft weniger genau sind.

Wenn das QCSM-Modul zur Verfügung steht, sind QCSM-Messungen das Mittel der Wahl, da dann mit wenigen Messungen eine Vielzahl von Messpunkten zur Verfügung steht und sie außerdem genauer sind als schnelle Härtemessungen. Es wird empfohlen QCSM-Messungen mit einer Maximalkraft von 100mN durchzuführen und für Messungen bei größeren Lasten schnelle Härtemessungen zu verwenden.

Bei schnellen Härtemessungen sollten beim 2N Messkopf des UNAT mindestens folgende Lasten verwendet werden:

500mN, 300mN, 100mN, 50mN, 30mN, 10mN, 5mN, 3mN, 2mN, 1mN, 0,5mN.

Bei Bedarf können zusätzlich Messungen über 500mN genutzt werden.

Bei Messungen mit QCSM Modul reicht eine Messserie mit 100mN. Wird eine Kalibrierung bei größeren Lasten oder Tiefen benötigt, können zusätzlich schnelle Härtemessungen mit 500mN, 1000mN, 1500mN und 2000mN durchgeführt werden. Es ist nicht sinnvoll QCSM Messungen mit Lasten über 500mN durchzuführen.

Im folgenden Beispiel wird die Bestimmung der Flächen- und Steifigkeitsfunktion anhand von Messungen an Quarzglas und Saphir erläutert.

6.1.2 Zweiter Schritt: Verarbeitung der Rohdaten

Die einzelnen Messungen mit gleichem Messablauf müssen nun korrigiert, gemittelt und als AVR-File abgespeichert werden. Dies erfolgt wie in unter Abschnitt 4.5 beschrieben. Nur die AVR-Files können für die weitere Auswertung verwendet werden. Die DAT-Files sind dafür nicht geeignet.

6.1.3 Dritter Schritt: Erzeugung eines AREA-Files

In diesem Schritt werden die gerade erzeugten AVR-Files verwendet, um daraus ein sogenanntes AREA-File zu erstellen, mit Hilfe dessen dann die endgültige Berechnung der Flächenfunktion erfolgt. Das AREA-File ist eine Testdatei, die dazu benutzt wird, die Flächenfunktion zu berechnen. Sie kann mit einem Texteditor geöffnet werden und hat den folgenden Aufbau:

Fmax	hmax	ho	S	m
0.51661	0.038271	0.009040	16.91126	1.5000

Fmax – Maximalkraft der Messung
hmax - maximale Eindringtiefe der Messung
h0 – Tiefe nach Entlastung
S - Kontaktsteifigkeit
m – Exponent der Entlastungskurve

Um den AREA-File zu erzeugen, wird der Menüpunkt ***File → Open AVR files for area function*** verwendet. Alle AVR-Files, die zu den Messungen eines Referenzmaterials gehören, sollten zusammen geöffnet werden.

Seit IndentAnalyser Version 3.0.7 ist es möglich, mehrere QCSM-Messungen oder auch Messungen mit QCSM-Modul und schnelle Härtemessungen zusammen einzulesen und ein einziges AREA-File daraus zu erstellen.

Anschließend ist dem AREA-File im Save-Dialog ein Namen zu geben. Der Vorschlag für den Namen lautet: **Areafunction_Probenname.AREA**. Es wird empfohlen, die Bezeichnung des Referenzmaterials und Nummer des Indenters zu verwenden, z.B. **Areafunction_Quarz_B1.AREA**.

Achtung: Zum Erstellen des AREA-Files werden alle Ergebnisse, die sich in der **Results-Table** befinden, gelöscht.

Die beschriebene Prozedur zur Ermittlung der Flächenfunktion mit Quarzglas ist nun entsprechend für Saphir durchzuführen. Als Poissonzahl ist in diesem Fall der Wert 0.234 zu verwenden.

6.1.4 Vierter Schritt: Berechnung von Flächenfunktion und Gerätesteifigkeit

Zur Ermittlung der Indenter-Flächenfunktion für spitze Indenter wird der Menüpunkt

Calibration → Area function and instrument stiffness from plastic deformations aufgerufen.

Es erscheint das Fenster **Indenter area function**, in dem bereits eine blaue Kurve für einen idealen Indenter des Typs, der in der Konfiguration eingetragen ist, erscheint.

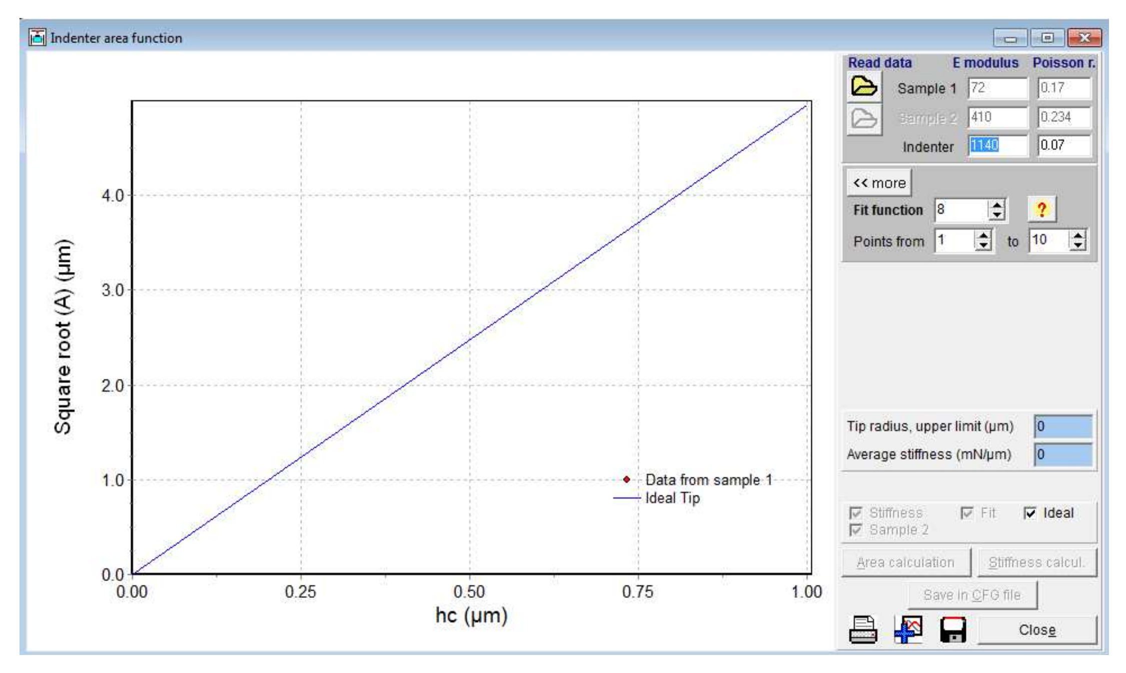
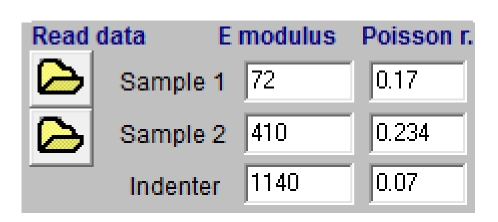


Abb. 103: Das Fenster für die Berechnung der Indenter-Flächenfunktion aus Messungen mit plastischem Deformationsanteil

A) Eingabe der Daten

Die AREA-Files werden im Bereich **Read data** rechts oben mit der **Open**-Schaltfläche eingelesen. den. Im Beispiel sind das Quarzglas für Probe 1 und Saphir für Probe 2.



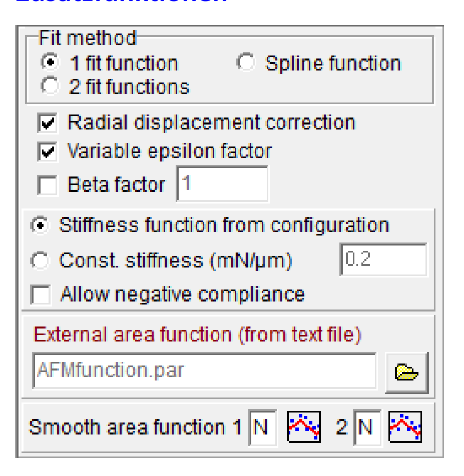
Anschließend sind die korrekten Daten für Elastizitätsmodul (**E modulus**) bzw. Poissonzahl (**Poisson r.**) für diese Referenzmaterialien sowie für den Indenter (im Beispiel Diamant) einzutragen. Die Werte für Quarzglas, Saphir und Diamant stehen bereits in den Feldern und sie müssen nur geändert werden, wenn andere Materialien verwendet werden.

Nun kann bereits die Berechnung der Flächenfunktion durch Drücken von **Area calculation** gestartet werden (siehe unten).

Für spezielle Untersuchungen sind weitere Einstellungen möglich, die über die Schaltfläche 

zugänglich sind. Dies wird jedoch im Normalfall nicht nötig sein.

Zusatzfunktionen



Fitmethode



Es kann unter drei Fitmethoden gewählt werden, um die Flächenfunktion zu beschreiben:

- Eine Fitfunktion
- Zwei Fitfunktionen
- Verwendung einer Spline-Funktion (in dieser Version nicht verfügbar)

Abb. 104: Das Teilfenster mit Zusatzfunktionen für die Berechnung der Flächenfunktion

Standard ist die Verwendung von einer Funktion. Die Verwendung von zwei Fitfunktionen ermöglicht es, die Daten im Bereich sehr kleiner Eindringtiefen wo die Kurven stärker gekrümmt sind, etwas genauer zu beschreiben. Diese Methode sollte jedoch nur verwendet werden wenn mindestens 10 oder mehr verschiedene Lasten zum Erstellen der Flächenfunktion verwendet wurden.

Radial displacement correction

Diese Korrektur berücksichtigt die radiale elastische Deformation **ur** parallel zur Oberfläche innerhalb der Kontaktfläche und erhöht die Genauigkeit der Flächenfunktion. Daher ist das Feld *Radial displacement correction* standardmäßig aktiviert. Für die meisten Materialien liegt diese Korrektur unterhalb von 2%. Für das oft verwendete Quarzglas beträgt sie jedoch mehr als 4,5%. Eine Kalibrierung unter Verwendung von Quarzglas würde folglich die Ergebnisse aller anderen Materialien mit geringerer radialer Verschiebung beeinflussen (siehe auch Kapitel 3.3.5).

Variabler Epsilon-Faktor

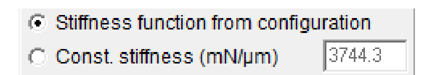
Diese Korrektur berücksichtigt einen variablen Epsilon-Faktor, der im Gegensatz zu dem festen Wert 0,75 im ISO Standard in Abhängigkeit vom Exponent der Entlastungskurve zwischen 0,7 – 0,8 schwanken kann. Er erhöht die Genauigkeit der Flächenfunktion und wird daher standardmäßig verwendet (siehe auch Kapitel 3.3.5).

Beta-Faktor



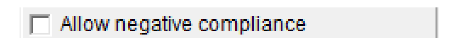
Beim Setzen eines Häkchens in das Feld *Beta factor* kann für den Beta-Faktor β ein Wert eingetragen werden, der vom Standardwert 1 abweicht. Der Standardwert 1 sollte nur geändert werden, wenn dies unbedingt erforderlich ist (siehe Kapitel 3.3.5).

Gerätesteifigkeit



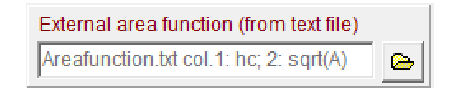
In diesem Bereich wird ausgewählt, ob für die Berechnung die Steifigkeitsfunktion aus der Konfiguration verwendet wird (Standard, empfohlen) oder eine lastunabhängige, konstante Gerätesteifigkeit in mN/µm.

Erlauben einer negativen Gerätenachgiebigkeit



Die Nachgiebigkeit ist die inverse Steifigkeit. Sollte die Steifigkeit in den Messdaten bereits überkorrigiert sein (dies kann besonders bei Daten von anderen Geräten als dem UNAT auftreten), so lässt sich die Gerätesteife nicht mehr korrekt kalibrieren. In diesem Fall ist es besser eine Compliance-Funktion statt einer Steife-Funktion zu verwenden. Durch eine negative Compliance kann die Überkorrektur bereinigt werden. Die Verwendung einer negativen Gerätenachgiebigkeit ist jedoch hier zu bestätigen, da sie im Normalfall nicht auftreten dürfte.

Verwendung einer externen Flächenfunktion



Ist eine Indenter-Flächenfunktion verfügbar, die mit einer direkten Messung bestimmt wurde (z.B. durch Abtasten mit einem Atomkraftmikroskop AFM), kann diese Funktion in der Grafik angezeigt werden und die Gerätesteife kann im Vergleich zu dieser Funktion berechnet werden. Solch eine Messung erfordert ein sehr gut kalibriertes AFM. Eine Standard-Kalibrierung mittels eines konventionellen AFM ist normalerweise nicht genau genug. Die AFM-Funktion muss in einem Textfile mit der Endung **TXT** abgespeichert sein. In dem File müssen zwei Spalten vorhanden sein, die mit einem Tabulator getrennt sind. Die erste Spalte enthält die Kontakttiefe (hc) und die zweite die Wurzel aus der Kontaktfläche (sqrt(A)). Das Einlesen des Textfiles erfolgt durch Anklicken der Open-Schaltfläche .

Flächenfunktionen glätten



Wenn die Berechnung der Flächenfunktion durchgeführt wurde, kann man die errechneten Datenpunkte auf solche Weise glätten, dass sie der Fitfunktion besser folgen. Dies kann unabhängig und nur einmal für beide Referenzmaterialien erfolgen, indem man **Smooth area function** anklickt. Nach dem Anklicken verändert sich die Anzeige. Man erkennt die durchgeführte Glättung an dem Buchstaben Y (Yes) anstelle von N (No)

Smooth area function 1 Y 2 Y

Es wird empfohlen, die Glättung vor der Berechnung der Steifigkeitsfunktion durchzuführen. Damit erhält man bessere Ergebnisse für die Gerätesteifigkeit.

B) Berechnung der Flächenfunktion

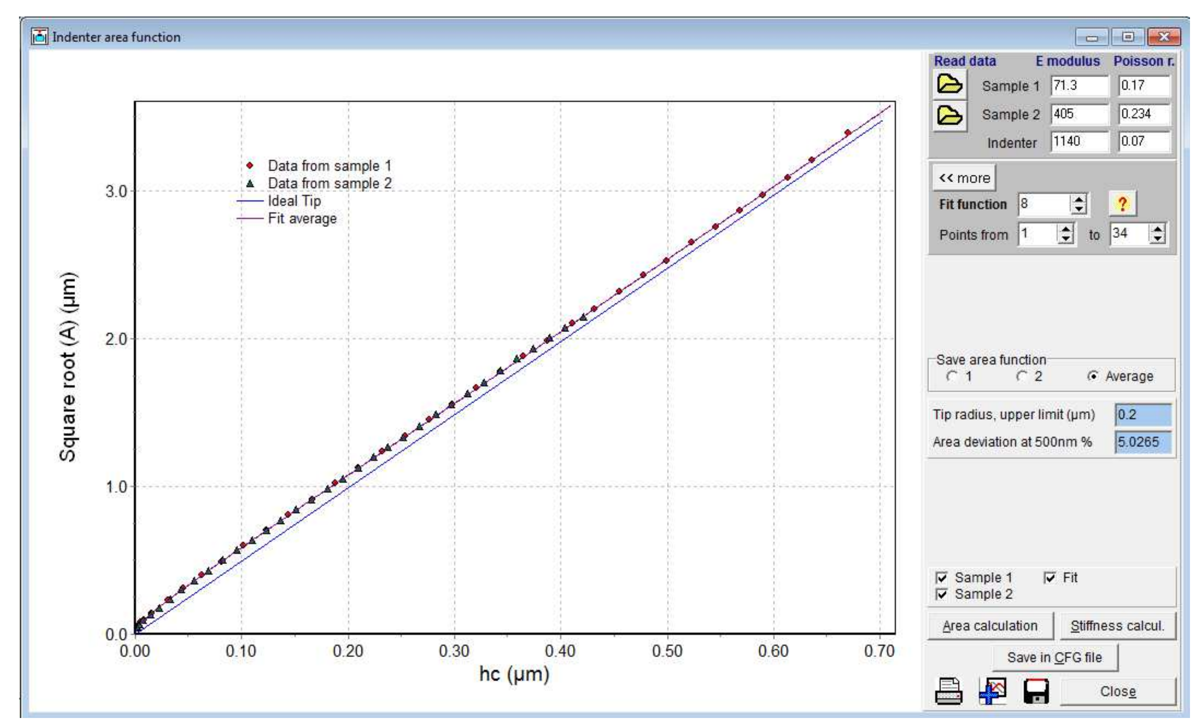


*Abb. 105: Das Fenster **Indenter area function** nach dem Berechnen der Flächenfunktion mit 2 Materialien*

Nach dem Anklicken der Schaltfläche ***Area calculation*** erfolgt die Berechnung und das Ergebnis wird als Graph angezeigt. Wie in Abb. 105 sollte die Funktion bei größeren Tiefen etwa parallel zu der blauen Linie der idealen Fläche verlaufen und leicht darüber liegen. Wenn der Graph die Linie für die ideale Fläche schneidet oder sich immer weiter entfernt, wird sehr wahrscheinlich eine falsche Gerätesteifigkeit verwendet oder der Indenter ist defekt. Die roten Punkte kennzeichnen die Messwerte von Quarzglas und die grünen die von Saphir. Die Punkte werden mit einer Fitfunktion beschrieben, die als durchgezogene Linie zu sehen ist.

Mit **Save area function** [Save area function: 1 / 2 / Average] wird festgelegt, ob das Ergebnis für Material 1, 2, oder der Mittelwert aus beiden als Flächenfunktion gespeichert wird. Standardmäßig ist dies der Mittelwert (**Average**) für beide Materialien (sofern zwei eingelesen wurden) da er normalerweise am genauesten ist.

Tip radius, upper limit: gibt einen Schätzwert für die obere Grenze des Spitzenradius an. Er wird mit Hilfe der zwei Punkte ermittelt, die am dichtesten am Nullpunkt liegen. Durch sie wird eine Kreisfunktion gelegt. Daher ist dieser Wert umso genauer, je dichter wie Werte bei Null liegen. Im Beispiel liegt der erste Punkt von Saphir bei 14,5nm. Der tatsächliche Wert des Spitzenradius kann etwas besser sein, jedoch nicht schlechter. Wenn der erste Punkt einen zu großen Abstand vom Nullpunkt hat (beispielsweise 50nm oder mehr) ist dieser Schätzwert zu groß.

Area deviation at 500nm (%): gibt die Abweichung der berechneten Kontaktfläche in einer Tiefe von 500nm gegenüber einer idealen Fläche (ohne Spitzenverrundung) in Prozent an. Dies ermöglicht eine Einschätzung der Fertigungsqualität oder des Abnutzungsgrades der Spitze und einen guten Vergleich durch Bezug auf immer die gleiche Tiefe.

Fitfunktion



Die Indenter-Flächenfunktion und die Gerätesteifigkeit werden mit einer Fitfunktion beschrieben um sie später für die Auswertung nutzen zu können. Diese Funktion sollte den Datenpunkten so genau wie möglich folgen.

Im Programm kann die **Quadratwurzel der Kontaktfläche als Funktion der Eindringtiefe** durch verschiedene Fitfunktionen beschrieben werden. Es wird empfohlen, die Übereinstimmung zwischen Fitfunktion und Datenpunkten visuell zu überprüfen. Dabei sollte man den Bereich kleiner Tiefen in der Grafik herauszoomen, da dort der Verlauf der Funktion besonders wichtig ist (siehe Abb. 106). Im Feld *Fit function* wird die Auswahl der Fitfunktion vorgenommen (siehe Kapitel 8.4). Die ***Schaltfläche*** ? öffnet ein kleines Fenster, das die Terme der Funktion beschreibt. Das Zeichen ^ bedeutet dabei Potenz (z.B. x^2 = x^2).

Die Anzahl der Terme C_n kann zwischen 1 (Funktion 4) und 9 (Funktion 12) variieren. Die Anzahl der Terme muss kleiner als die Anzahl der Datenpunkte sein, andernfalls wird eine Warnung angezeigt und die Rechnung wird nicht durchgeführt.

Im gewählten Beispiel wurde die Fitfunktion 8 mit 5 Termen C_n gewählt:

$$y = C_1 + C_2 \cdot x^{1/4} + C_3 \cdot x^{1/2} + C_4 \cdot x + C_5 \cdot x^{3/2}.$$

Fitpunkte von / bis



Bestimmt den Fitbereich für die Flächen- oder Steifigkeitsfunktion. Punkt 1 ist der Wert mit der geringsten Eindringtiefe bzw. Kraft. Als Standard gilt *Points from* **1** to *Maximalzahl* der Punkte.

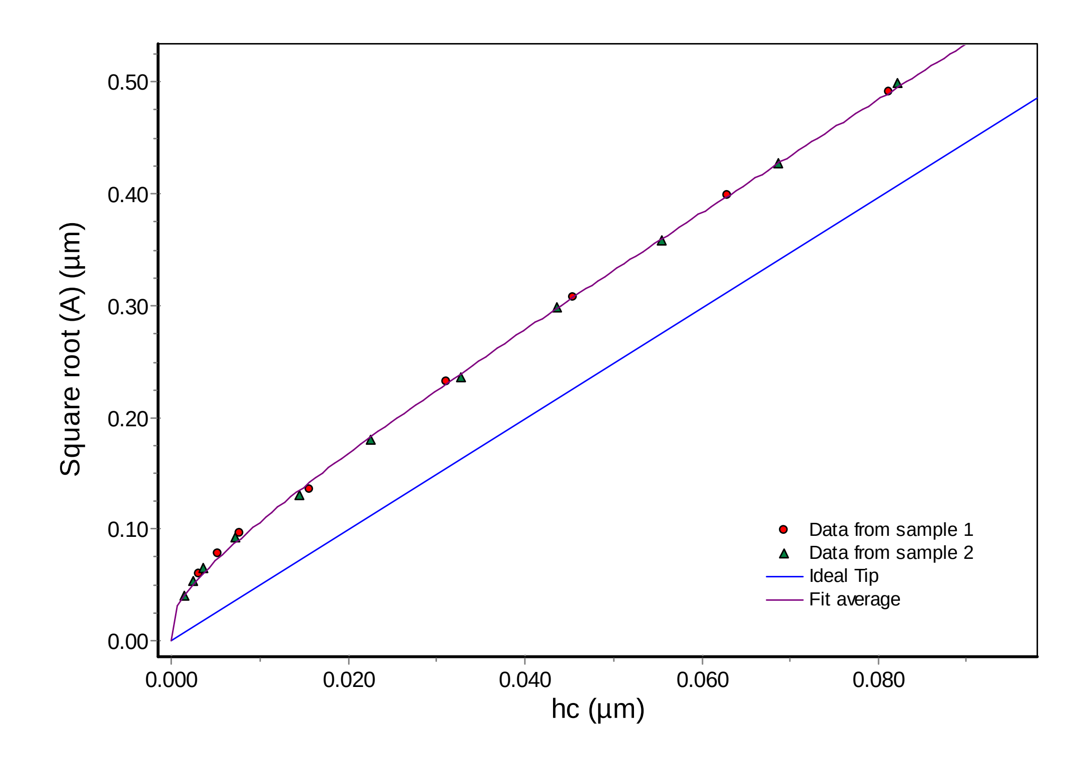


Abb. 106: Beginn der Flächenfunktion mit den Ergebnissen von Quarzglas und Saphir. Die künstlichen Punkte befinden sich unterhalb on 20nm. Die Übereinstimmung zwischen beiden Materialien ist sehr gut.

Achtung: Zur Berechnung der Flächenfunktion werden vier künstliche Punkte unterhalb des Messpunktes mit der kleinsten Eindringtiefe hinzugefügt, wobei eine kugelförmige Spitze des Indenters in diesem Tiefenbereich angenommen wird. Diese Punkte dienen dazu, die Fitfunktion im Bereich sehr kleiner Eindringtiefen zu führen und die Genauigkeit zu verbessern. Deshalb ist die Punktanzahl um vier größer als die Zahl im AREA-File.

Das Ergebnis sollte nun in einem neuen Konfigurationsfile (CFG) gespeichert werden. Die Speicherung erfolgt mit der Schaltfläche ***Save configuration***.

Achtung: ***Falls noch keine korrekte Steifigkeitsfunktion gespeichert wurde, hat dies zuerst zu erfolgen. Erst danach darf die Flächenfunktion gespeichert werden. Eventuell muss die Berechnung der Flächenfunktion wiederholt werden.***

C) Berechnung der Gerätesteife

Die Funktion der Gerätesteife betrachtet den Beitrag der Gerätekomponenten wie Rahmen, Tischsystem, Proben- oder Indenterbefestigung auf die messbare Deformation. Der Gerätebeitrag muss von der gemessenen Verschiebung abgezogen werden, um die reine Deformation von Probe + Indenter zu erhalten. Kein Gerät hat eine unendliche Steifigkeit. Abhängig vom Gerätetyp kann die Steifigkeit zwischen 100 mN/µm und einigen 1000 mN/µm variieren. Auch Geräte mit einer relativen Verschiebungsmessung gegen die Probenoberfläche (unter Verwendung eines Zylinders oder eines Referenzkontaktes) haben eine Restnachgiebigkeit, die in Betracht zu ziehen ist (Nachgiebigkeit = inverse Steifigkeit). In das Ergebnis für die Gerätesteife gehen auch die Fehler von Tiefen- und Kraftkalibrierung ein. Deshalb wird ein Steifigkeitsergebnis immer durch die Kalibrierung beeinflusst. Sofern sich eine ungewöhnliche Steifefunktion ergibt, kann dies auch an einer mangelhaften Kalibrierung von Kraft oder Wegmessung liegen.

Die Kalibrierung der Gerätesteifigkeit ist eine der schwierigsten Aufgaben in der Nanoindentation-Praxis und erfordert sorgfältig ausgewählte Referenzmaterialien mit gut bekannten elastischen Eigenschaften. Es wird empfohlen, ein Glas mit einem Elastizitätsmodul zwischen 60 und 100 GPa und andere Materialien mit einem großen E-Modul wie Saphir zu verwenden. Die Materialien sollten keinen Pile-up-Effekt aufweisen, wenn Messungen im plastischen Bereich durchgeführt werden (pile-up = Auftreten von Aufwölbungen an den Rändern des Eindrucks, so dass die Kontaktfläche vergrößert wird).

Die Steifigkeits- und Flächenfunktionskalibrierung hängen voneinander ab und können nur auf iterative Weise durchgeführt werden.

Theorie

Die Kontakttiefe wird berechnet gemäß
$$h_c = h_{max} - F \cdot C_f - \varepsilon(m) \cdot F \cdot \left(\frac{1}{S} - \frac{1}{S_f}\right)$$

Die Quadratwurzel aus der Kontaktfläche ist
$$\sqrt{A_C} = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \frac{1}{E_r} \frac{1}{1/S - 1/S_f} (1 + u_r)$$

Der reduzierte Modul Er ist gegeben durch:
$$\frac{1}{E_r} = \frac{1-\nu_i^2}{E_i} + \frac{1-\nu_s^2}{E_s}$$

Die radiale Verschiebungskorrektur u_r ist gegeben durch
$$u_r = \frac{(1-2\nu)(1+\nu)}{2} \frac{F}{E \cdot a^2} \cos(\arctan(\frac{h_0}{a}))$$

Messwerte

- F – Maximalkraft
- S – Kontaktsteife der Probe
- h_{max} – maximale Tiefe
- ho – Tiefe nach Entlastung
- m – Entlastungsexponent

Wichtig: Die Messdaten (außer m) werden aus der Kraft-Verschiebungs-Kurve ohne Steifigkeitskorrektur erhalten (unkorrigierte Daten). Dies wird im Programm realisiert, auch wenn eine Steifigkeitsfunktion in der Konfiguration verwendet wird.

Bekannte Werte

- E – Elastizitätsmodul des Indenters (Index i) und der Probe (Index s)
- ν - Poissonzahl des Indenters (Index i) und der Probe (Index s)

Berechnete Werte

- hc –Kontakttiefe
- sqrt(A) –Quadratwurzel der Kontaktfläche
- Sf –Gerätesteifigkeit. Sie wird in der Berechnung variiert, beginnend mit unendlicher Steifigkeit.

Nach der Berechnung von zwei Flächenfunktionen für die beiden Referenzmaterialien kann die Gerätesteife durch einen Vergleich der beiden Flächenfunktionen berechnet werden. Die Flächenfunktion darf nicht vom Referenzmaterial abhängen. Wenn es einen Unterschied gibt (besonders bei größeren Eindringtiefen oder Lasten), so liegt das meistens an ungenauen Steifigkeitswerten für das Gerät.

Für die Berechnung wird zuerst eine unendliche Steife angenommen und dann schrittweise verringert, bis beide Flächenfunktionen optimal übereinstimmen. Die Flächenfunktion für das steifere Material mit dem größeren E-Modul reagiert viel stärker auf Änderungen der Gerätsteife als das Material mit kleinerem E-Modul, so dass sich beide Funktionen bei einer bestimmten Steife überdecken. Dies kann lastabgängig sein, so dass am Ende kein konstanter Steife-Wert entsteht, sondern eine Steifefunktion, die von der Last abhängt. Bei kleinen Lasten unter 20mN (beim 2N Messkopf) ist diese Berechnung meist zu ungenau, so dass die Punkte unter dieser Last für die Berechnung der Steifefunktion weggelassen werden sollten.

Zum Start der Rechnung ist die Schaltfläche ***Stiffness calculation*** zu drücken. Die grafische Darstellung ändert sich in **Instrument stiffness function**.

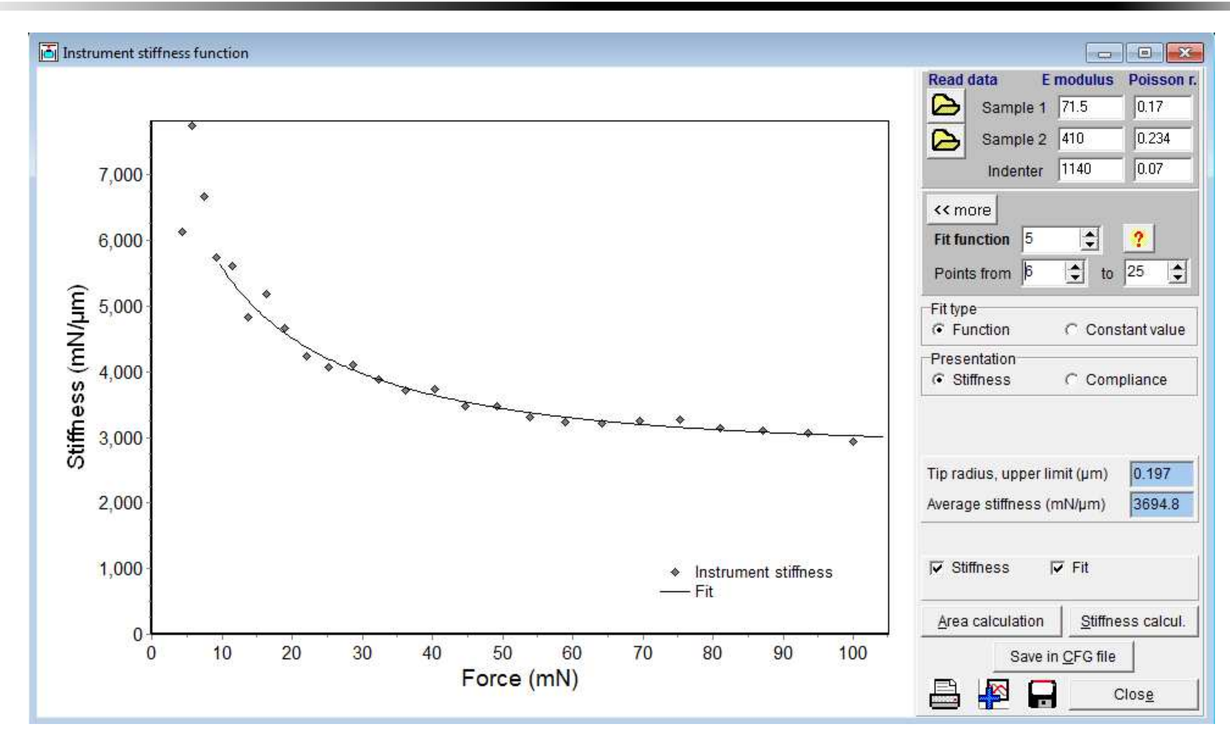


*Abb. 107: Das Fenster **Indenter stiffness function** nach dem Berechnen der Funktion der Gerätesteife*

Im Idealfall ist die ermittelte Steifefunktion eine parallele Gerade zur Kraftachse (konstante Steife). Oft gibt es jedoch Abweichungen bei kleinen Kräften. Dies liegt zu einem großen Teil auch an Unzulänglichkeiten des Referenzmaterials. Quarzglas zeigt beispielsweise bei kleinen Kräften einen ausgeprägten sink-in Effekt, der umso größer ist, je größer der Spitzenradius ist. Dies führt zu einer Überschätzung der Fläche und damit zu zu großen Steife-Werten. Dies ist auch die Ursache für den Anstieg der Kurve in Abb. 107 zu kleinen Kräften hin. Bis 100 mN ist eine solche Krümmung, wie in Abb. 107 noch zu tolerieren. Bei größeren Kräften, sollte der Verlauf besser waagerecht sein. Ein besseres Beispiel mit einem nahezu idealen Verlauf der Steife als Funktion der Kraft zeigt Abb.108.

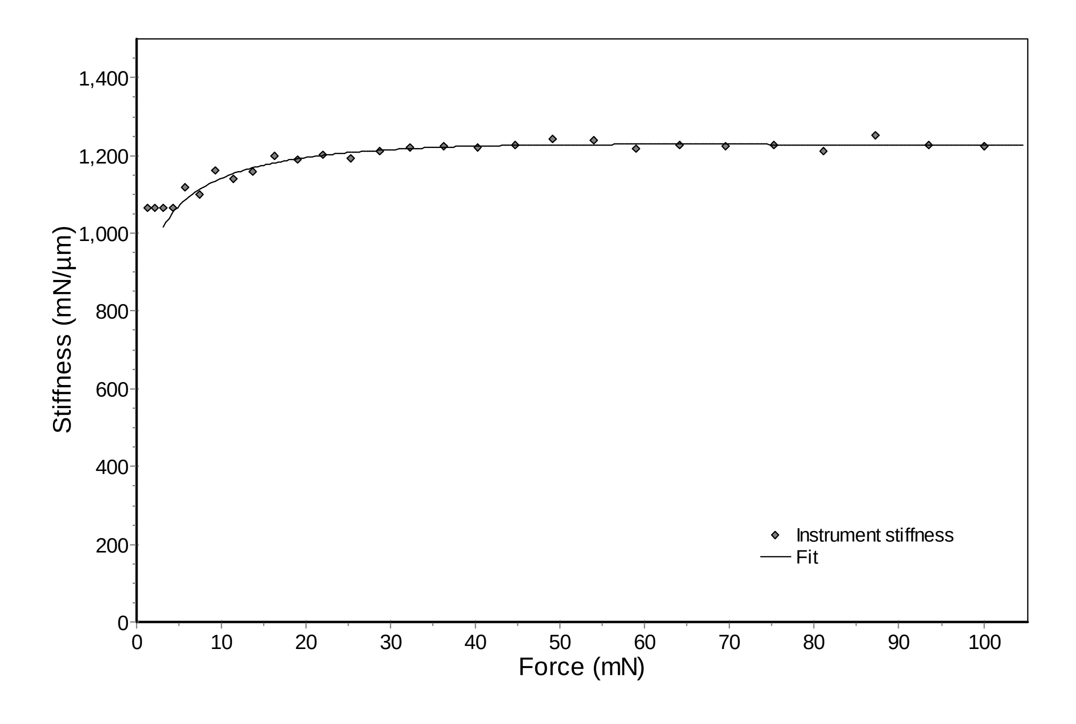


Abb.108: Steifefunktion für einen Berkovich-Indenter mit nahezu idealem Verlauf

Es ist von großer Bedeutung, dass die Kurve bei größeren Kräften annähernd waagerecht verläuft, ansonsten lässt sich die Steife nicht mehr richtig korrigieren. ***Daher muss beim Fit der Steife-Werte unbedingt darauf geachtet werden, dass die Kurve am rechten Rand annähernd waagerecht ausläuft und die Fitkurve keine Überschwingen zeigt.*** Die folgenden Grafiken zeigen weitere Beispiele für Steifigkeitskurven bei Maximalkräften von 2000mN und 500mN.

Sollte sich kein waagerechter Verlauf der Steifekurve bei größeren Lasten einstellen lassen, stimmt eventuell die Kraftkalibrierung des Gerätes nicht mehr oder es gibt undefinierte Steife-Komponenten, z.B durch eine unzureichende Befestigung der Referenzprobe. Gegebenenfalls ist der Service zu informieren und die zugehörigen Kalibriermessungen sind zu übermitteln.

Es hat sich herausgestellt, dass Fitfunktion Nummer 5 am besten solche Kurven beschreiben kann. Man muss sowohl mit der Fitfunktion als auch mit der Punktnummer für den Beginn des Fits (bei kleinen Kräften) etwas experimentieren, um die optimale Fitfunktion zu finden, die in einen waagerechten Verlauf endet.

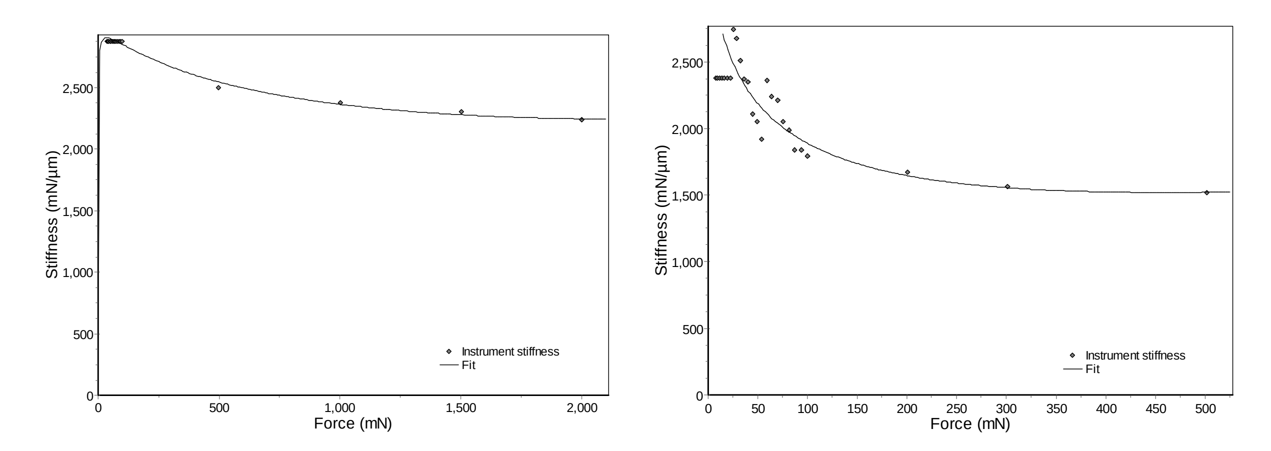


Abb. 109: Beispiele für Steifigkeitsfunktionen bei Maximalkräften von 2000mN (links) und 500mN (rechts).

Das Feld **Average stiffness** zeigt nach der Rechnung die mittlere Steife über alle Punkte des Fitbereichs an.

Presentation: Dieses Auswahlfeld erscheint erst nach Berechnung der Steife-Funktion. Hier kann man von der Steife-Funktion (Standard) zur Darstellung als Compliance-Funktion (Nachgiebigkeit) umschalten.

Fit type: Dieses Auswahlfeld erscheint erst nach Berechnung der Steife-Funktion. Anstelle einer Funktion kann mit **Constant value** auch eine waagerechte Gerade durch die Steife-Punkte gelegt werden (siehe Abb. 110). Dies ist zu empfehlen, wenn die Steife-Punkte stark streuen oder wenn die Funktion nicht in eine waagerechte Gerade ausläuft. Dabei sollte der Wert Points from vergrößert werden damit vor allem die rechten Punkte für die größten Lasten berücksichtigt werden.

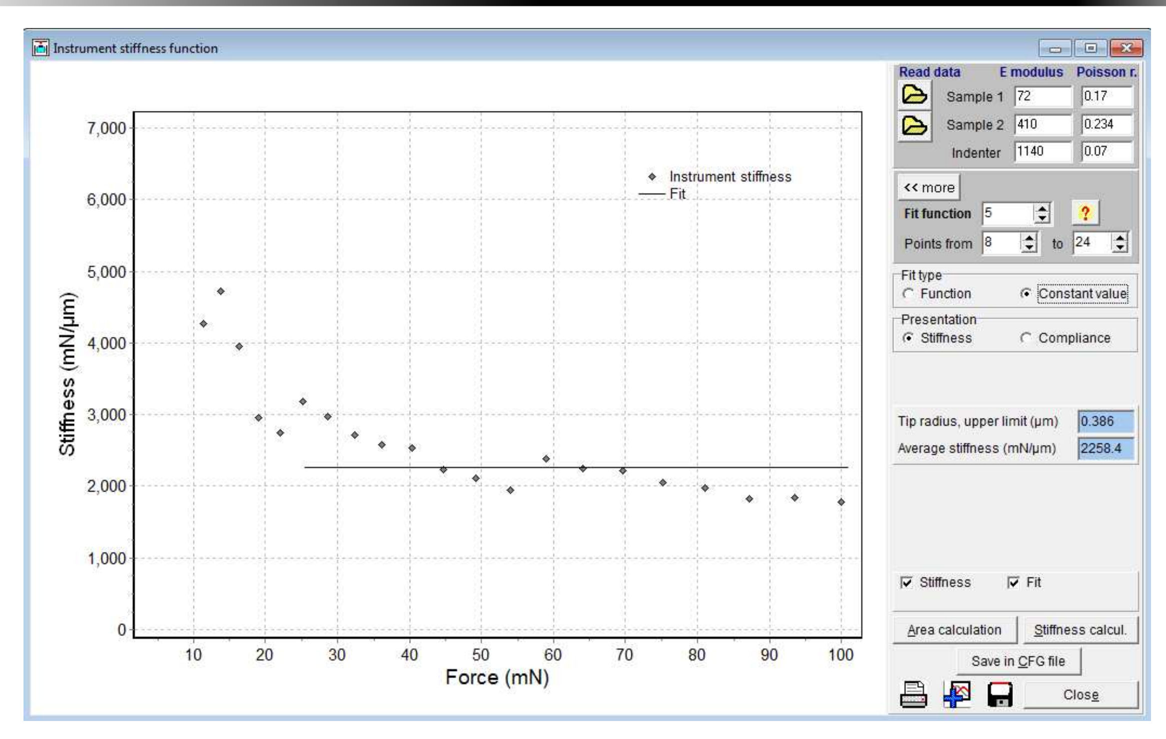


Abb. 110: Beispiel für die Beschreibung der Gerätesteife mit einem konstanten Wert.

Das Ergebnis der Steife-Berechnung wird durch Anklicken der Schaltfläche ***Save CFG file*** als CFG-Datei abgespeichert.

D) Wiederholte Berechnung der Flächenfunktion nach Berechnung der Gerätesteifigkeit

Mit der nur korrekt gespeicherten Steifefunktion muss die Flächenfunktion erneut durch Anklicken der Schaltfläche ***Area calculation*** berechnet werden. Das neue Ergebnis der Flächenfunktion wird in der gleichen CFG-Datei abgespeichert. Die Frage nach dem Überschreiben kann mit Ja beantwortet werden. Bei jedem Abspeichern werden jeweils nur die neu berechneten Funktionen abgespeichert. Alle anderen Daten in der Konfigurationsdatei bleiben unverändert.

Die gespeicherte CFG-Datei wird als Standard gesetzt und in allen weiteren Aufrufen der Software verwendet.

Damit ist die Kalibrierung von Flächenfunktion und Gerätesteife abgeschlossen.

Achtung: Wenn die Gerätesteife nicht konstant ist, hat die Steifekorrektur einen Einfluss auf die Krümmung der Entlastungskurve. Daher ändert sich der Exponent **m** der Entlastungskurve für den Fit mit Potenzfunktion. Dieser Wert wird jedoch auch für die Berechnung der Flächenfunktion bei Nutzung des variablen Epsilon-Wertes verwendet und beide Rechnungen beeinflussen einander.

Daher kann es notwendig sein Schritt 3 (Export als AREA File) und 4 (Steifeberechnung) iterativ zwei- bis dreimal nacheinander durchzuführen, wenn die Steifefunktion stärker gekrümmt ist. In so einem Fall ist es am besten zunächst einen konstanten Steifwert (Fit type = constant value) wie in Abb. 110 zu verwenden, dann das AREA File zu erstellen und erst in der zweiten Iteration eine Funktion zuzulassen.

6.2 Berechnung aus vollständig elastischen Deformationskurven

Vollkommen elastische Verformung kann normalerweise nur mit einem Kugelindenter und bei genügend harten Materialien erreicht werden. Daher eignet sich diese Kalibrierung nicht für Polymere und weiche Metalle. Außerdem muss die Oberflächenrauigkeit klein sein, weil andernfalls einzelne Rauheitsspitzen zuerst plastisch verformt werden. Dies würde gegen das elastische Modell verstoßen.

Die Berechnung wird sehr ähnlich zu der für plastische Verformungen durchgeführt. Der einzige Unterschied besteht darin, dass nur Messungen mit **einer Kraft** benötigt werden, da die Kontaktsteifigkeit für jeden Belastungspunkt berechnet werden kann, wenn Belastungs- und Entlastungskurve übereinstimmen.

Durch Vorversuche ist zu ermitteln, in welchem Kraftbereich rein elastische Messungen möglich sind. Bei einem 10µm Indenter werden beispielsweise meist 70mN für Quarzglas und 100mN für Saphir verwendet.

Der erste Schritt (Messung des Referenzmaterials) und der zweite Schritt (Auswertung der Rohdaten) sind dieselben wie für plastische Verformungen mit dem Unterschied, dass nur ein AVR-File für eine Maximalkraft (nicht für viele Kräfte) erzeugt werden muss. Der dritte Schritt (Erzeugung einer AREA-Datei) entfällt.

Bei der erstmaligen Kalibrierung eines neuen Kugelindenters ist zunächst folgendes zu tun:

- Öffnen des Fensters **Configuration,** Seite **Indenter**.
- Auswahl von ***Sphere*** im Feld **Indenter type** und Eintragen einer Nummer in das Feld **Indenter no.**. Ebenso sind einzutragen: Beschreibungen für das *Indenter material*, Werte für *Young's modulus (GPa)* und *Poisson's ratio* des Indenters sowie der nominelle Spitzenradius (*Tip radius)*
- Abspeichern der Eintragungen mit der Schaltfläche ***Save*** in einem neuen Konfigurationsfile das entsprechend der Indenternummer und dem Speicherdatum benannt werden sollte.

Die Kalibrierung erfolgt über das Menü ***Calibration → Area function and instrument stiffness from elastic deformations***. Das Fenster **Indenter area function** wird geöffnet. Messungen an zwei verschiedenen Referenzmaterialien mit einem signifikanten Unterschied im Elastizitätsmodul sind notwendig, wenn nicht nur die Flächenfunktion, sondern auch die Gerätesteifigkeit kalibriert werden sollen.

A) Eingabe der Daten

Die AVR-Files werden im Bereich **Read data** rechts oben mit der **Open**-Schaltfläche eingelesen. den. Im Beispiel sind das Quarzglas für Probe 1 und Saphir für Probe 2.

Anschließend sind die korrekten Daten für Elastizitätsmodul (**E modulus**) bzw. Poissonzahl (**Poisson r.**) für diese Referenzmaterialien sowie für den Indenter (im Beispiel Diamant) einzutragen. Die Werte für Quarzglas, Saphir und Diamant stehen bereits in den Feldern und sie müssen nur geändert werden, wenn andere Materialien verwendet werden.

In Feld **Show** kann gewählt werden zwischen der Darstellung von

- Load-Depth – komplette Kraft-Eindringtiefen Kurve mit Be- und Entlastung
- LD Average – Mittelwert von Be- und Entlastung der Kraft-Eindringtiefen Kurve
- Sample stiffness – berechnete Steifigkeitswerte aus dem Anstieg der gemittelten Kurve
- Exponent – lokaler Exponent der Kraft-Eindringtiefen-Kurve, der für die Bestimmung des variablen Epsilon-Wertes benötigt wird

Nach der Berechnung kann angezeigt werden:

- Area function – Flächenfunktion, ermittelt für ein oder zwei Materialien
- Instr. Stiffness – Funktion der Gerätesteife oder Nachgiebigkeit

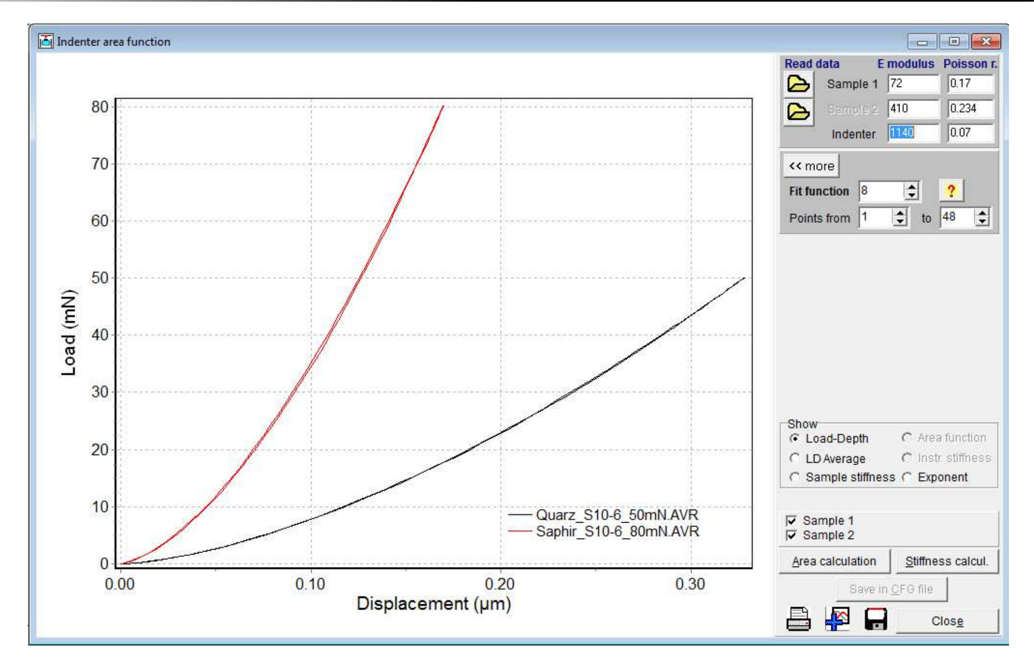


Abb. 111: Kraft-Eindringtiefe-Kurven von zwei Referenzmaterialien für rein elastische Messungen

B) Erste Berechnung der Flächenfunktion

Die Berechnung der Flächenfunktion wird durch Drücken von **Area calculation** gestartet.

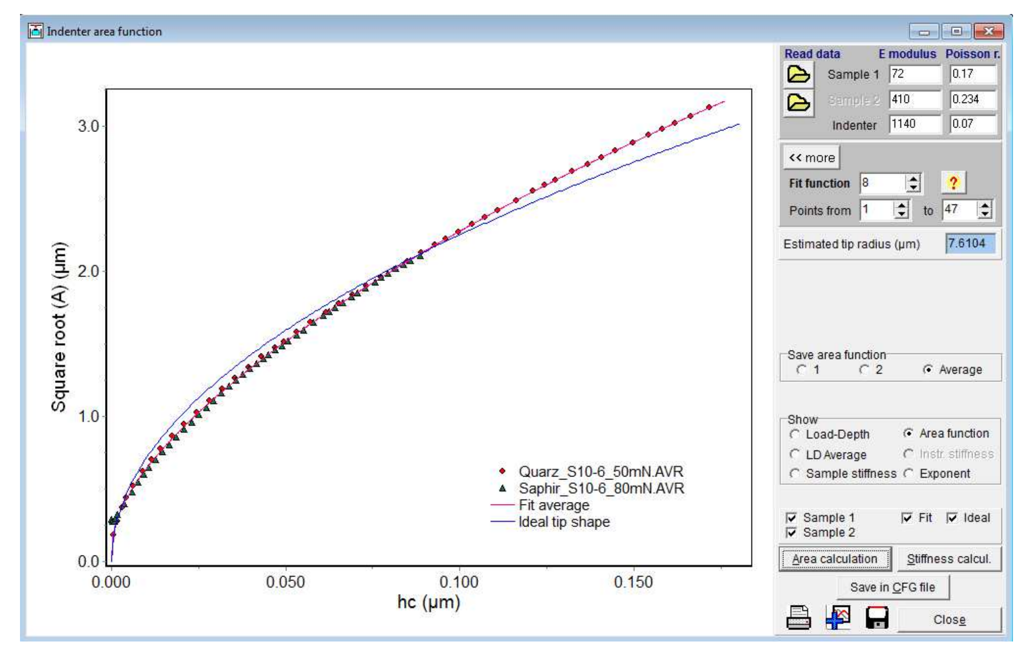


Abb. 112: Flächenfunktion eines Kugelindenters mit etwa 7,6µm Radius, bestimmt mit Quarz und Saphir

Die blaue Linie repräsentiert die Form einer idealen Kugel mit dem in der Konfiguration definierten Nominalradius. Die Punkte repräsentieren die berechneten Flächenwerte für die Messdaten, und die durchgezogene Linie repräsentiert die Fitfunktion. Standardmäßig werden die Daten beider Materialien für den Fit verwendet *Save area function: Average*.

Estimated tip radius: Aus den Fitkurven wird ein mittlerer Radius des Indenters berechnet und hier in Mikrometer angezeigt. Er kann deutlich vom Nominalradius abweichen, da bei rein elastischen Messungen oft nur Tiefen zwischen 100 nm und 300 nm erreicht werden während der Indenterradius vom Hersteller über einen Tiefenbereich von 10% - 20% des Radius bestimmt wird.

Alle weiteren Felder und das zusätzliche Teilfenster, dass mit der Schaltfläche << more erreicht wird, haben die gleichen Funktionen, wie unter Abschnitt 6.1 beschrieben.

C) Berechnung der Gerätesteifigkeit

Durch Anklicken der Schaltfläche ***Stiffness calcul.*** wird die Gerätesteifigkeit berechnet. Dies erfolgt wiederum durch einen iterativen Prozess, der eine Weile dauern kann. Die grafische Darstellung ändert sich in **Instrument stiffness function**.

Da bei rein elastischen Messungen pile-up und sink-in Effekte der Referenzmaterialien keine Rolle spielen, wird meist eine recht konstante Gerätesteife ermittelt.

Das Feld **Average stiffness** zeigt nach der Rechnung die mittlere Steife über alle Punkte des Fitbereichs an. Alle Felder haben die gleichen Funktionen, wie unter Abschnitt 6.1 beschrieben.

Das Ergebnis der Steife-Berechnung wird durch Anklicken der Schaltfläche ***Save CFG file*** als CFG-Datei abgespeichert.

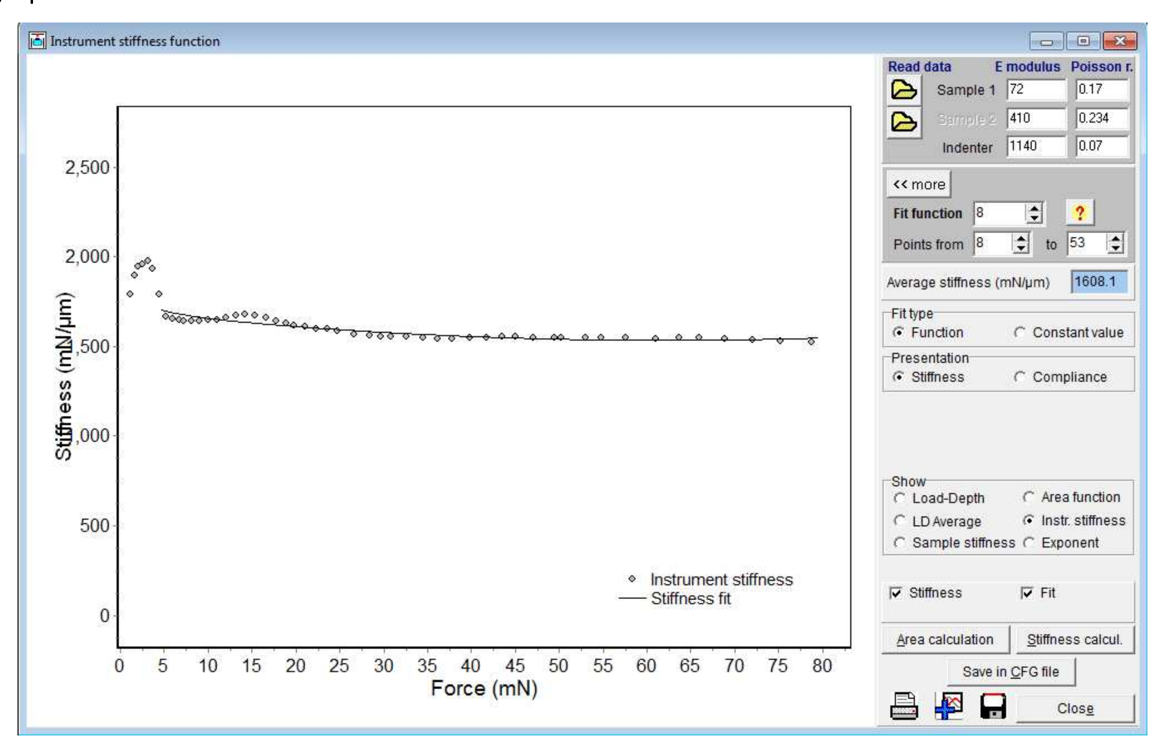


*Abb. 113: Das Fenster **Indenter stiffness function** nach dem Berechnen der Funktion der Gerätesteife aus elastischen Messungen*

D) Wiederholte Berechnung der Flächenfunktion nach Berechnung der Gerätesteifigkeit

Mit der nur korrekt gespeicherten Steifigkeitsfunktion muss die Flächenfunktion erneut durch Anklicken der Schaltfläche ***Area calculation*** berechnet werden. Das neue Ergebnis der Flächenfunktion wird in der gleichen CFG-Datei abgespeichert. Die Frage nach dem Überschreiben kann mit Ja beantwortet werden. Bei jedem Abspeichern werden jeweils nur die neu berechneten Funktionen abgespeichert. Alle anderen Daten in der Konfigurationsdatei bleiben unverändert.

Die gespeicherte CFG-Datei wird als Standard gesetzt und in allen weiteren Aufrufen der Software verwendet.

6.3 Kalibrierung des effektiven Indenterradius

Anstelle der Flächenfunktion ist für verschiedene Anwendungen die Radiusfunktion eines Kugelindenters von Bedeutung. Sie beschreibt den effektiven Radius als Funktion der effektiven Eindringtiefe. Die effektive Eindringtiefe h_{eff} ist die Deformation der Probe (Index s) ohne die Deformation des Indenters (Index i). Die Deformationsanteile entsprechen den Verhältnissen der E-Moduli. Der effektive Radius ist der Radius R_{eff} einer idealen Kugel, der die gleiche Eindringtiefe **h** bei der gleichen Kraft **F** ergibt, wie der nicht-ideale Indenter. E_r ist das reduzierte E-Modul.

$$h_{eff} = \frac{h}{1 + \frac{(1-\nu_i)^2 \cdot E_s}{(1-\nu_s)^2 \cdot E_i}} \qquad R_{eff} = \frac{9}{16} \cdot \frac{F^2}{E_r^{\,2} \cdot h^3}$$

Der effektive Radius wird beispielsweise benötigt, um die Spannungen in der Oberfläche der Probe bei einem Kontakt mit kugelförmiger Spitze zu berechnen. Dies betrifft die Auswertung rein elastischer Messungen mit der Applikation Elastic modulus measurements with spheres, Abschnitt 5.5, aber auch die Auswertung von Scratchtests.

Das Fenster für die Kalibrierung der Radiusfunktion wird über **Calibration → Effective sphere radius** geöffnet.

Der erste Schritt (Messung des Referenzmaterials) und der zweite Schritt (Auswertung der Rohdaten) sind dieselben wie für plastische Verformungen mit dem Unterschied, dass nur ein AVR-File erzeugt werden muss. Der dritte Schritt (Erzeugung einer AREA-Datei) ist nicht notwendig.

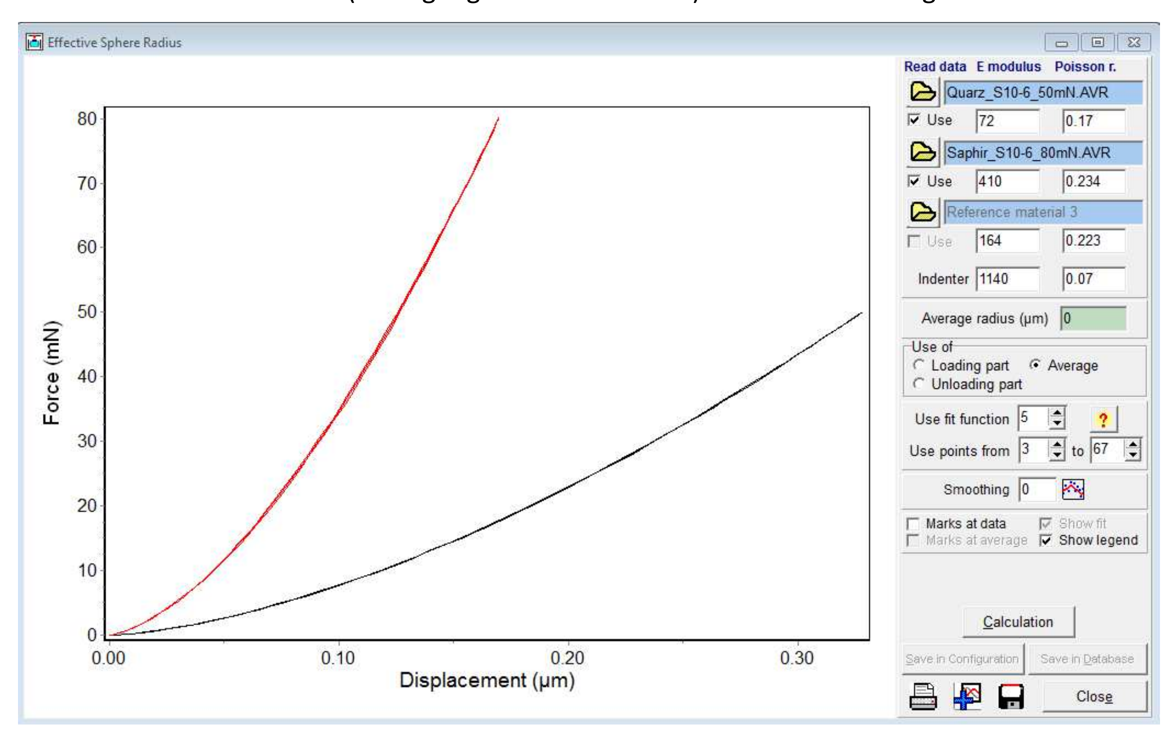


*Abb. 114: Das Kalibrier-Fenster **Effective Sphere Radius** mit den Messkurven von Quarz und Saphir*

A) Eingabe der Daten

Im Gegensatz zu den vorigen Kalibrierfenstern ist es im Fenster Effective Sphere Radius möglich Daten von bis zu drei verschiedenen Referenzmaterialien einzulesen.

Im rechten oberen Teil **Read data** des Fensters kann mit der **Open**-Schaltfläche jeweils ein AVR-File eingelesen werden. Der Filename der eingelesenen Datenfiles wird daneben angezeigt. Im Beispiel sind das für Probe 1 Quarzglas und für Probe 2 Saphir. Probe 3 wird im Beispiel nicht verwendet. Soll

eins der Datenfiles nicht für die Rechnung verwendet werden, kann es durch Entfernen des Häkchens im **Use**-Feld deaktiviert werden.

Anschließend sind die korrekten Daten für Elastizitätsmodul (**E modulus**) bzw. Poissonzahl (**Poisson r.**) für diese Referenzmaterialien sowie für den Indenter (im Beispiel Diamant) einzutragen. Die Werte für Quarzglas, Saphir, Silizium und Diamant stehen bereits in den Feldern und sie müssen nur geändert werden, wenn andere Materialien verwendet werden.

In Feld **Use of** kann gewählt werden ob die Berechnung nur für die Belastungskurve, die Entlastungskurve oder dem Mittelwert aus beiden (*Average*) erfolgen soll.

B) Erste Berechnung der Radiusfunktion

Die Berechnung der Radiusfunktion wird durch Drücken von **Calculation** gestartet. Im Feld **Average radius** wird der mittlere effektive Radius für den Bereich berechnet, in dem Daten von allen (hier von beiden) Referenzmaterialien vorhanden sind.

Die berechneten Radiusfunktionen werden als blaue (für Material 1) und grüne (für Material 2) Kurve in der Grafik angezeigt. Der Mittelwert aus beiden wird als rote Kurve dargestellt. Er wird mit einer Fitfunktion beschrieben, die als schwarze, dickere Linie in der Grafik zu sehen ist.

Die Felder **Use fit function** und **Use points from – to** haben die gleiche Bedeutung wie unter 6.1.4 beschrieben. Die Fitfunktion und die Punkte sind so zu variieren, bis eine optimale Übereinstimmung zwischen den Messdaten und der Fitkurve erreicht ist. Als Standard wird Funktion **5** vorgegeben.

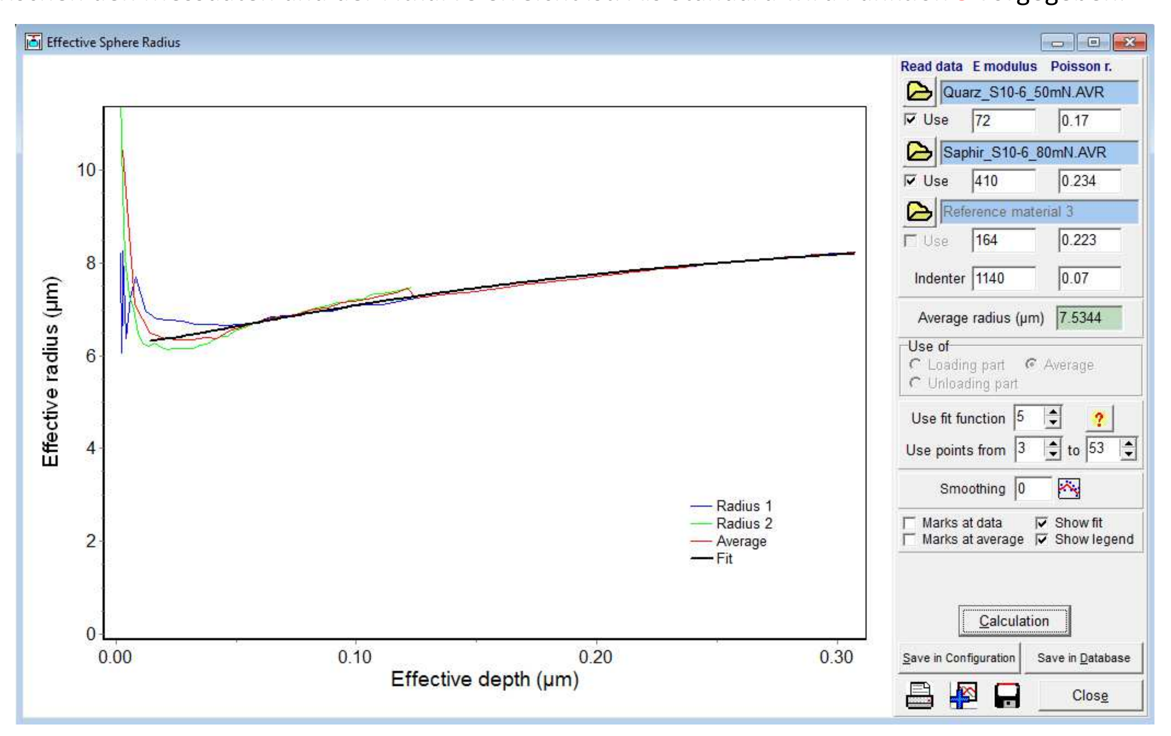


*Abb. 115: Das Fenster **Effective Sphere Radius** mit den Ergebnissen der Rechnung und des Fits*

Daten aus einem Tiefenbereich unter 20nm sind in diesem Beispiel wenig zuverlässig und sollten ignoriert werden.

Das Ergebnis der Radius-Berechnung wird durch Anklicken der Schaltfläche ***Save in Configuration*** als CFG-Datei abgespeichert. Als Unterscheidung von einer Flächenfunktion sollte im Namen das Wort Radius auftauchen.

6.4 Bestimmung der Gerätesteife aus Hochlast-Eindrücken mit Pyramiden

Dieses Kalibrierverfahren für die Gerätesteife beruht darauf, dass bei pyramidenförmigen Eindringkörpern eine quadratische Abhängigkeit zwischen Kraft und Eindringtiefe existiert: $F \propto h^2$. Wenn man die Belastungskurve eines Eindrucks mit Vickers- oder Berkovich-Indenter in eine homogene Probe mit einer Pozenzfunktion $F = C * h^m$ fittet, muss sich ein Exponent **m** von annähernd 2 ergeben. Dies ist allerdings erst möglich, wenn die Spitzenverrundung keine Rolle mehr spielt, d.h. ab Eindringtiefen von mindestens 6 µm. **Dadurch eignet sich das Verfahren nicht für Nanoindenter,** oder es müssen sehr weiche Metallproben wie unlegiertes Aluminium verwendet werden.

Kleinere Abweichungen von dem Idealwert von 2,0 treten allerdings auch durch Kriecheffekte während des Eindringvorgangs auf und durch eine Härteabnahme mit zunehmender Tiefe (auch bei ideal homogenen Proben), so dass der Wert des Exponenten meist etwas kleiner ist und zwischen 1,96 – 1,99 liegt. Ideal ist eine Belastung mit konstanter Dehnrate bei der gilt $\frac{\dot{h}}{h} = const$. Dies führt zu einer exponentiellen Kraftzunahme über der Zeit.

Wenn der gemessene Exponent der Belastungskurve in eine homogene Probe kleiner ist als 1,96 – 2,0 dann liegt es an der unzureichend oder gar nicht korrigierten Gerätesteife.

Als Proben für hohe Lasten im Makro-Bereich eignen sich metallische Härtevergleichsplatten. Es gelten die gleichen Voraussetzungen für Referenzproben wie unter 6.1.1 genannt. Das folgende Beispiel wurde mit einem Zwick Universalhärte-Prüfkopf im Kilonewton-Bereich gemessen.

Die Kalibrierung erfolgt über das Menü ***Calibration → Instrument stiffness from large indentations with pyramidal indenter***. Das Fenster **Instrument stiffness function** wird geöffnet. Mit der **Open**-Schaltfläche jeweils ein AVR-File eingelesen werden. Dieses File muss zuvor durch Mittelung mehrerer Einzelmessungen erstellt werden, um die Genauigkeit zu erhöhen. Das Fenster lässt die gleichzeitige Auswertung von zwei Messungen zu, um das Ergebnis besser vergleichen zu können. Der Name der eingelesenen Datei wird im Feld neben der Open-Schaltfläche angezeigt.

Nach dem Einlesen wird die Belastungskurve der Messung angezeigt. Abschnittsweise wird für jedes Stück der Belastungskurve der lokale Anstieg und damit der Exponent der Potenzfunktion bestimmt.

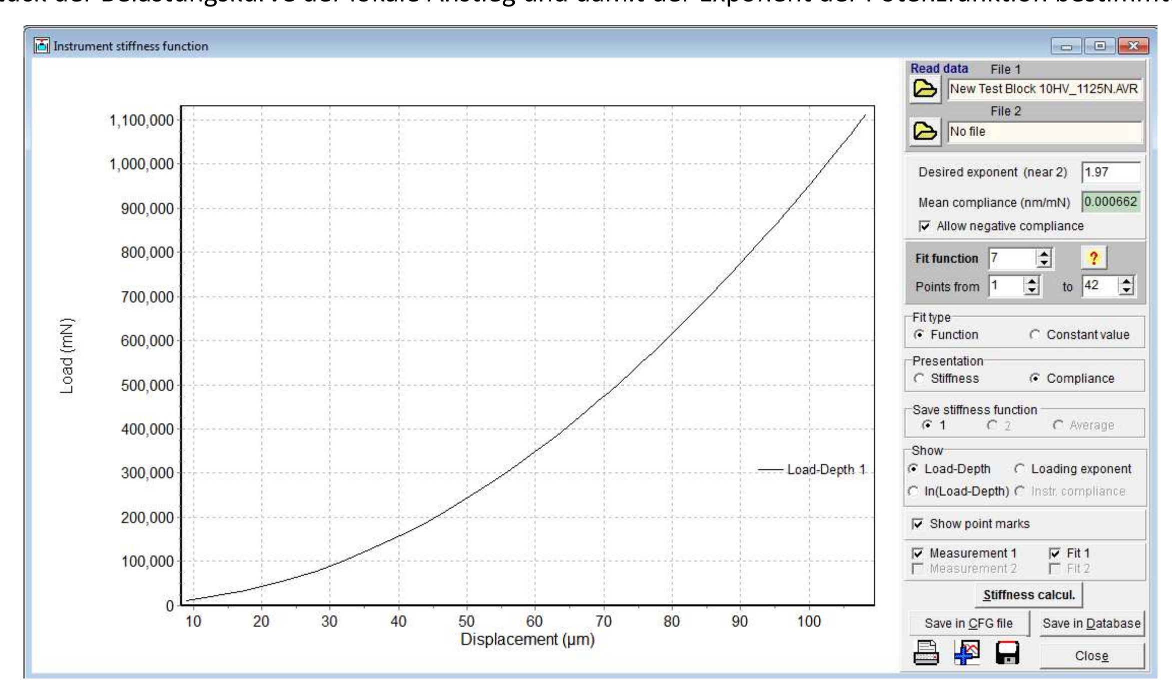


*Abb. 116: Das Kalibrier-Fenster **Instrument stiffness function** mit der Belastungskurve einer 1,1 kN Messung in eine Härtevergleichsplatte.*

In Feld **Show** kann gewählt werden zwischen der Darstellung von

- Load-Depth – Anzeige der Belastungskurve
- ln(Load-Depth) – Belastungskurve in logarithmischer Darstellung. Die Kurve sollte eine Gerade sein, andernfalls lässt sich die Korrekturmethode nicht anwenden.
- Loading exponent – Lokaler Exponent der Belastungskurve

Nach der Berechnung kann angezeigt werden:

- Instr. Stiffness – Funktion der Gerätesteife oder Nachgiebigkeit (*Presentation*: Stiffness)
- Instr. compliance – Funktion der Gerätenachgiebigkeit (*Presentation*: Compliance)

Durch Drücken von **Stiffness calcul.** wird die Berechnung gestartet. Die Krümmung der einzelnen Abschnitte der Belastungskurve wird durch Variation des Wertes für die Gerätesteife punktweise variiert bis der gewünschte Exponent erreicht wird. Wenn die Gerätesteife in den Messdaten bereits überkorrigiert wurde, können durch Anklicken von **Allow negative compliance** auch negative Werte für die Nachgiebigkeit zugelassen werden. Das Ergebnis für so einen Fall zeigt Abb. 118.

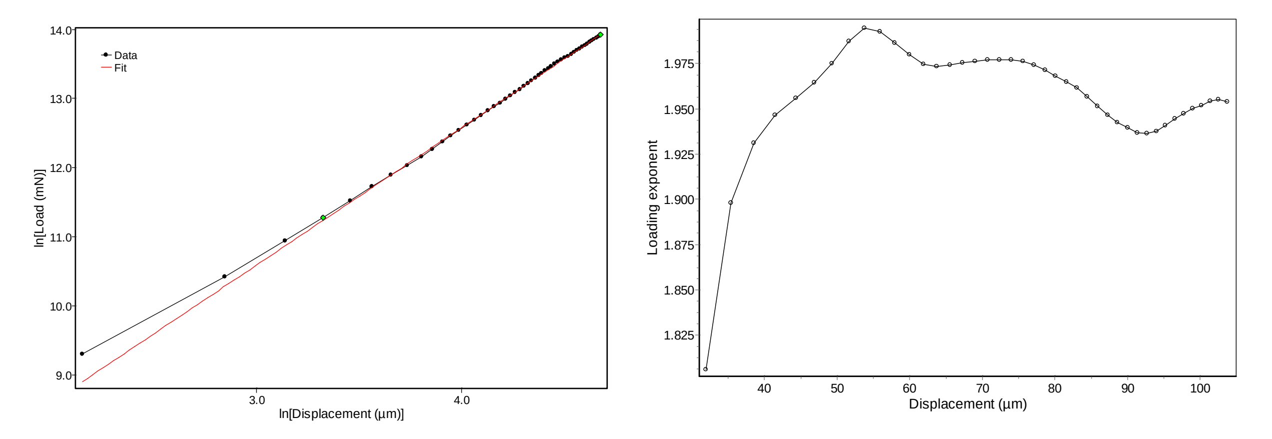


Abb. 117: Belastungskurve von Abb. 116 in logarithmischer Darstellung (links) und der lokale Exponent der Kurve als Funktion der Eindringtiefe (rechts). Erst bei Tiefen über 30µm liegt er über 1,9.

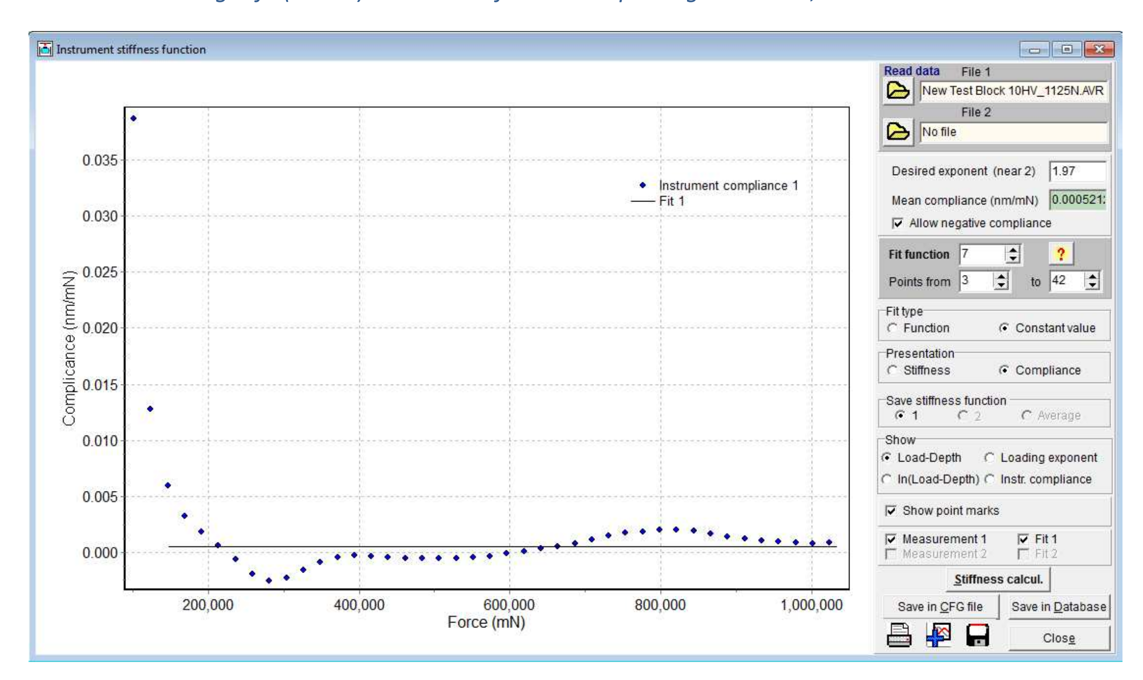


*Abb. 118: Das Fenster **Instrument stiffness function** nach der Berechnung der Gerätenachgiebigkeit und dem Zulassen negativer Werte. Hier ist es sinnvoll mit einem konstanten Wert zu fitten.*

Hier wurde mit einem Sollwert für den Exponenten von 1,97 gerechnet. Es ergeben sich negative Werte im Bereich von 300N.

Bei hohen Lasten hat der Wert für die Gerätesteife (Nachgiebigkeit) einen sehr großen Einfluss auf das Ergebnis. Wie vor Abschnitt 6.2 beschrieben kann sich bei Nutzung einer Steife-Funktion die Krümmung der Entlastungskurve ändern. Daher sollte bei hohen Lasten möglichst nur ein konstanter Wert für die Gerätesteife (Nachgiebigkeit) verwendet werden. Dies wird erreicht durch **Fit type: constant value**. Der erste Punkt für die Ermittlung der Steife kann über **Points from** variiert werden. Im Beispiel wurden die ersten zwei Punkte vernachlässigt. Das Ergebnis ist im Feld **Mean stiffness / Mean compliance** zu sehen. Die Nachgiebigkeit in diesem Beispiel ist mit 0,5nm/N sehr klein, weil bereits eine Steifekorrektur der Daten erfolgte.

Alle anderen Funktionen dieses Fensters entsprechen den im Abschnitt 6.2 beschriebenen.

Das Ergebnis der Steife-Berechnung wird durch Anklicken der Schaltfläche ***Save CFG file*** als CFG-Datei abgespeichert.

7 Hilfsmittel

Die Software enthält einige Hilfsmittel, um Experimente zu planen und auszuwerten.

7.1 Indentation force estimation

Das Fenster **Indentation force estimation** wird im Hauptmenü über *Tools → Indentation force estimation* erreicht. Es dient zur Versuchsplanung. Wenn die Härte und der E-Modul eines Materials bekannt ist, kann damit die Kraft abgeschätzt werden mit der eine bestimmt Eindringtiefe oder Kontakttiefe bei Eindruck mit einem pyramidenförmigen Indenter erreicht wird. Für andere Indentertypen (z.B. Kugeln) ist die Rechnung nicht möglich.

Die Auswahl, ob die Kraft für das Erreichen einen bestimmte Maximaltiefe oder Kontakttiefe berechnet werden soll, erfolgt über die **Set** Schaltfläche neben den entsprechenden Feldern. Es wird immer auch die andere Tiefe berechnet und angezeigt.

Wenn das Fenster *Average results* geöffnet ist, werden die Ergebnisse für Härte und E-Modul automatisch in das Fenster zur Abschätzung der Kraft übernommen.

Bei der Rechnung wird die Kontaktfläche mit Hilfe der Härte berechnet und die Kontaktsteife mit Hilfe des E-Moduls. Die Tiefe ergibt sich dann aus der inversen Flächenfunktion. Dadurch ist das Ergebnis recht genau (normalerweise besser als 2%).

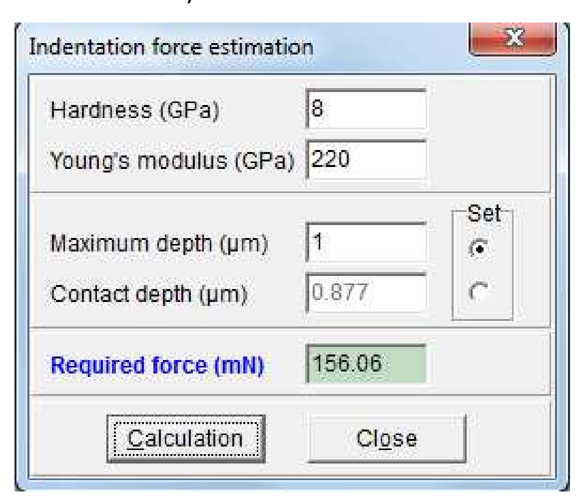


Abb. 119: Fenster zur Berechnung der Kraft für das Erreichen einer bestimmten Eindringtiefe

7.2 Modelling

Über den Menüpunkt **Modelling** kann nicht nur die Eindringtiefe bei einer bestimmten Kraft, Härte und E-Modul berechnet werden, sondern die gesamte Be- und Entlastungskurve. Wenn das Fenster *Average results* geöffnet ist, werden die Ergebnisse automatisch in das Fenster **Theoretical curve** übernommen.

Dieses Fenster dient zur Untersuchung der verschiedenen Einflussfaktoren auf die Gestalt der Kraft-Eindringtiefen-Kurve.

Mit dem Auswahlfeld **Pressure distribution** werden verschiedene Druckverteilungen an der Oberfläche simuliert, die durch einen konstanten Druck oder die Prüfkörpergeometrie bestimmt sind. Die Auswahl *Power function* korreliert die Druckverteilung mit dem Exponenten der Entlastungskurve. Bei einem *Unloading exponent* (Exponenten) von 1,5 entspricht die Druckverteilung genau der einer Kugel. Siehe dazu:

[T. Chudoba, N. M. Jennett, Higher accuracy analysis of instrumented indentation data obtained with pointed indenters, J. Phys. D: Appl. Phys. 41 (2008) 215407]

In dem unteren Auswahlfeld kann festgelegt werden, welche Deformation berechnet wird:

- Elastic deformation – rein elastische Deformation bei der entsprechenden Druckverteilung
- Elastic deformation above Ac – der Anteil der rein elastischen Deformation oberhalb der Kontaktfläche. Dies entspricht dem Wert hs in der Ergebnisliste.
- Plastic deformation – der rein plastische Anteil der Deformation, der sich aus der Härte und der Flächenfunktion ergibt
- Elastic + plastic deformation – die gesamte Deformation. Sie kann bei kugelförmigen Indentern auch rein elastisch sein, wenn die Fließgrenze nicht überschritten ist.

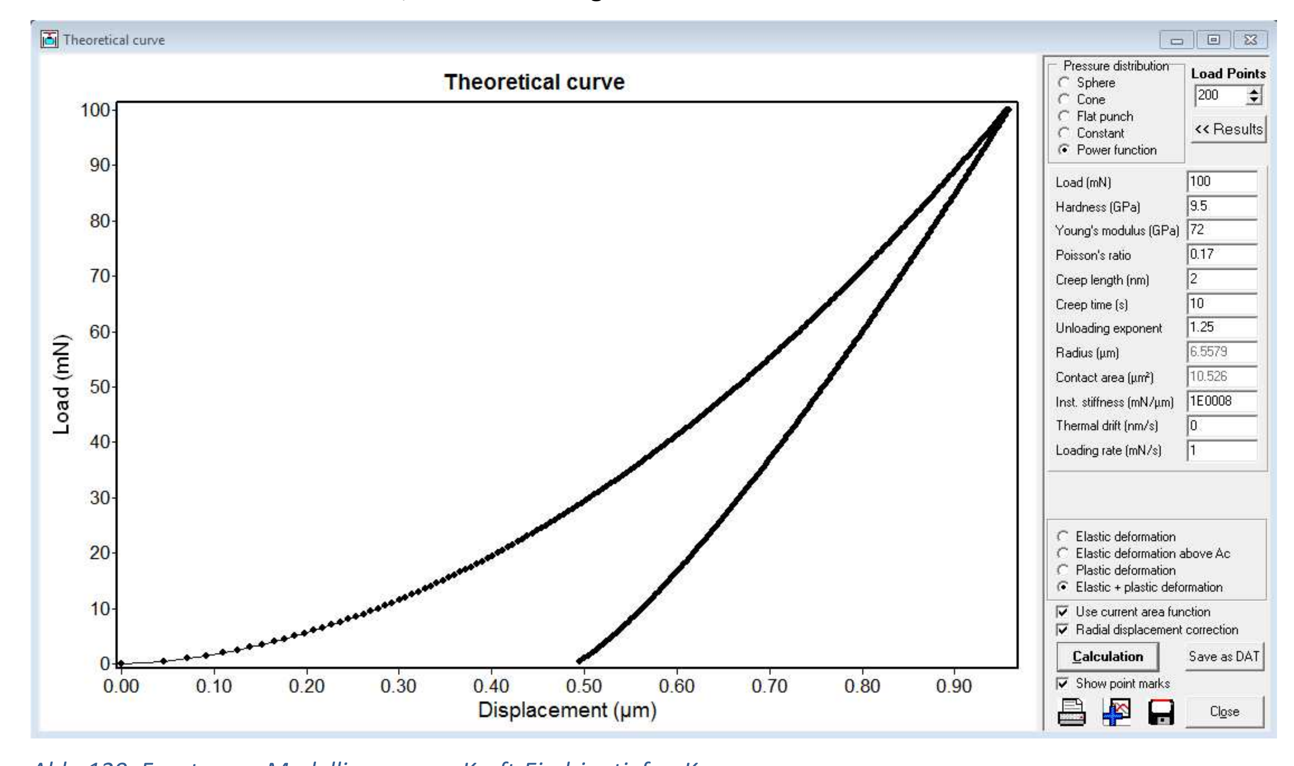


Abb. 120: Fenster zur Modellierung von Kraft-Eindringtiefen-Kurven

Nicht jede Kombination macht Sinn. So ist die Nutzung von *Power function* nur für elasto-plastische Eindrücke sinnvoll und dort auch am genauesten, da der Entlastungsexponent berücksichtigt werden kann. Abb. 120 zeigt die berechnete Kurve für die Parameter von Quarzglas mit einem Entlastungsexponenten von 1,25. Mit **<<Results** kann ein Feld geöffnet werden, in dem die berechneten Daten angegeben sind (s. Abb. 121). Die Formelzeichen sind in Kapitel 8.1 erklärt.

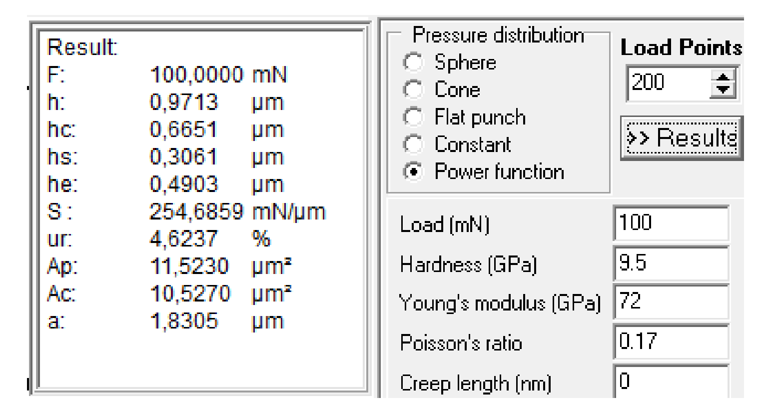


Abb. 121: Ergebnisfeld im Fenster Theoretical curve für die Daten von Abb. Abb. 120

Die theoretischen Kurven können über **Save as DAT** als Datenfile im IndentAnalyser/IndentAnalyser Format abgespeichert werden und anschließend wie Messdaten ausgewertet werden, um das Auswertemodell zu prüfen. Dabei ist zu beachten, dass entweder im Feld **Instrument stiffness** die tatsächliche Gerätesteife eingetragen und für die Berechnung verwendet wird, oder dass später mit einer unendlichen Gerätesteife ausgewertet wird.

Bei der Berechnung kann auch der Einfluss einer thermischen Drift simuliert werden. Dafür sind Werte in die Felder **Thermal drift** und **Loading rate** einzutragen, da die Auswirkung der Drift auch von der Be- und Entlastungsgeschwindigkeit abhängt.

Eine nützliche Funktion ist die Berücksichtigung der Flächenfunktion des aktuell verwendeten Indenters über **Use current area function**. Damit kann beispielsweise der Einfluss der Spitzenverrundung eines pyramidenförmigen Indenters auf die Eindringtiefe untersucht werden, wie in Abb. 122 gezeigt.

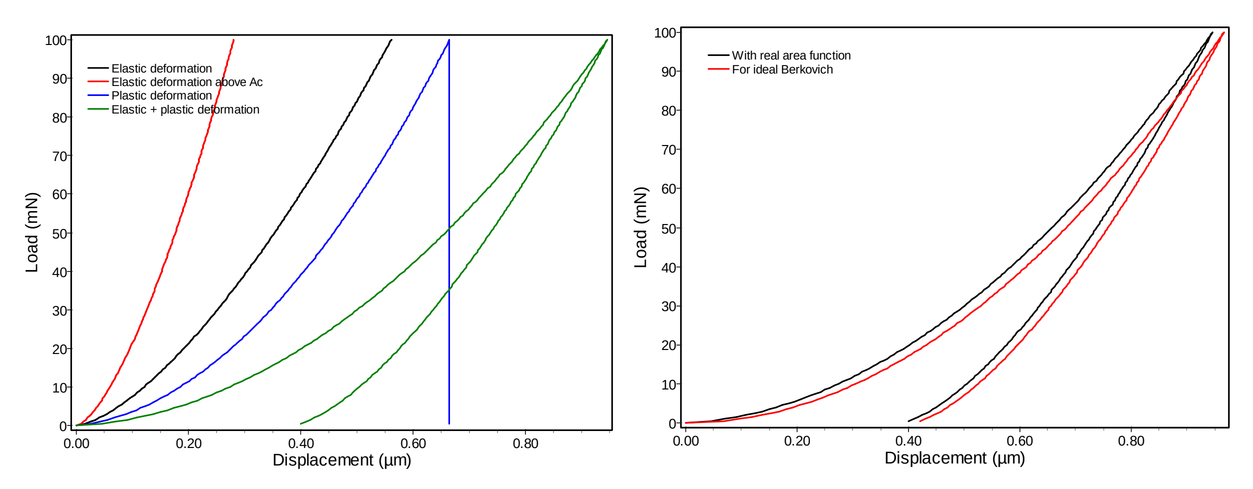


Abb. 122: Kraft-Eindringtiefen-Funktionen für die verschiedenen Deformationsanteile bei einer Druckverteilung einer Kugel und den Parametern für Quarzglas (links) und der Unterschied bei der Berechnung mit idealer Spitze und realer Flächenfunktion eines Berkovich Indenters (rechts).

Wenn kugelförmige Indenter verwendet werden, kann es bei bestimmten Parameterkombinationen zu kleinen Sprüngen in der Kurve kommen, da nicht alle Kombinationen sinnvolle Werte ergeben. Außerdem ist keine Auswahl bei der Druckverteilung zugelassen sondern es wird immer *Power function* verwendet. Trotzdem kann auch bei Kugeln der elastisch-plastische Übergang ganz gut simuliert werden. Der Radius der Kugel kann im Feld **Radius** variiert werden. Standardmäßig wird dort der Wert aus der Konfiguration verwendet.

7.3 Modulus converter

Der Modulus Converter dient zum Umrechnen der elastischen Konstanten und wird über *Tools → Modulus Converter* erreicht. Wenn das Fenster *Average results* geöffnet ist, werden die Ergebnisse automatisch in den Modulus Converter übernommen. Ein isotroper Körper ist durch zwei elastische Konstanten vollkommen definiert. Wenn der Elastizitätsmodul **E** (Young´s Modulus) und die Poissonzahl **ν** bekannt sind, können auch der Kompressionsmodul **K** (Bulk Modulus) und der Schermodul **G** (Shear Modulus) berechnet werden über die Formeln:

$$K = \frac{E}{3 - 6\nu} \qquad \text{und} \qquad G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)}$$

Durch Umstellen der Formeln können umgekehrt auch aus Kompressions- und Schermodul der Elastizitätsmodul und die Poissonzahl berechnet werden. Wenn eine der Größen geändert wird, werden im Fenster alle anderen automatisch neu berechnet. Dabei ist über die Schalter **E const** und **n const** festzulegen, ob Elastizitätsmodul oder Poissonzahl konstant bleiben sollen.

Der reduzierte E-Modul ist ein mittlerer Modul, der sich aus den elastischen Eigenschaften des Indenters (Index i) und der Probe (Index s) zusammensetzt. Dabei wird auch beim Indenter Isotropie vorausgesetzt. Er berechnet sich zu

$$\frac{1}{E_r} = \frac{1 - {\nu_i}^2}{E_i} + \frac{1 - {\nu_s}^2}{E_s}$$

Aus Eindruckexperimenten kann nur der reduzierte E-Modul direkt bestimmt werden. Der E-Modul der Probe lässt sich nur berechnen, wenn die elastischen Konstanten des Indenters bekannt sind und wenn für die Poissonzahl der Probe eine Annahme getroffen wird.

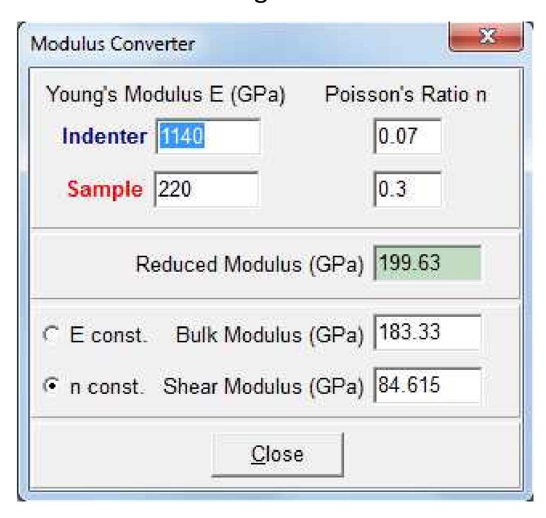


Abb. 123: Das Fenster Modulus Converter

7.4 Fit Data window

Das Fenster **Fit Data** ist ein mächtiges Werkzeug, um Daten verschiedenster Art zu fitten und die originalen zusammen mit den gefitteten Kurven darzustellen. Es wird über *Tools →Fit data window* geöffnet. Außerdem öffnet es sich, wenn eine Kurve aus dem *Comparison* Fenster durch Klicken der Schaltfläche Fit hineinkopiert wird.

Wenn das Fenster ohne Kopieren einer Kurve geöffnet wird, ist es zunächst leer. Daten können über die Schaltfläche **Read TXT** eingelesen werden. Es lassen sich nur Textdateien einlesen, die entweder im IndentAnalyser Exportformat für TXT-Dateien oder im alten GRA-Format von IndentAnalyser vorhanden

sein müssen. Außerdem lassen sich beliebige Textdateien einlesen, wenn ihr Format bekannt ist. Die Daten müssen spaltenweise mit beliebig vielen gleich langen Spalten gespeichert sein. Eine Anzahl von Kopf- oder Fußzeilen kann ignoriert werden. Mit der Schaltfläche öffnet sich das Fenster **ASCII import configuration**, mit dem das Format und auch die Dateiendung festgelegt werden können.

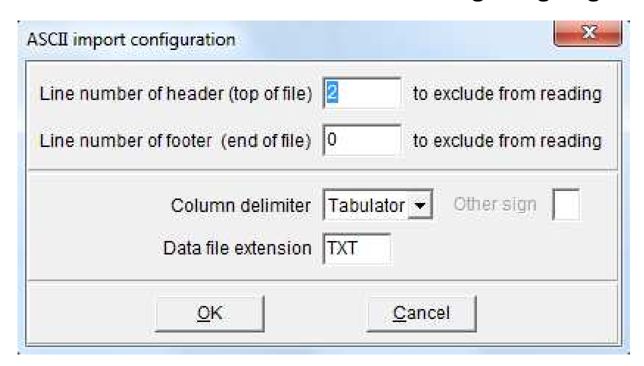


Abb. 124: Fenster zur Festlegung des Importformats für Textdateien

Wenn in der Datei mehr als 2 Spalten vorhanden sind, können die Spalten für die Darstellung der X- und Y-Werte in den Pull-Down Menüs **X column** und **Y column** ausgewählt werden. Standardmäßig wird Spalte 1 für X- und Spalte 2 für Y-Werte verwendet. In den Auswahlfeldern rechts daneben können die Daten noch umgewandelt werden mit No action – keine Änderung der Daten

Square (Y) – Y-Werte quadrieren

Square root (Y) – Wurzel aus positiven Y-Werten ziehen

1/Y – Y-Werte invertieren

Ln(Y) – Y-Werte logarithmieren

Außerdem können die X- und Y-Werte mit Falktoren multipliziert werden, die in die Felder **X factor, Y factor** einzugeben sind.

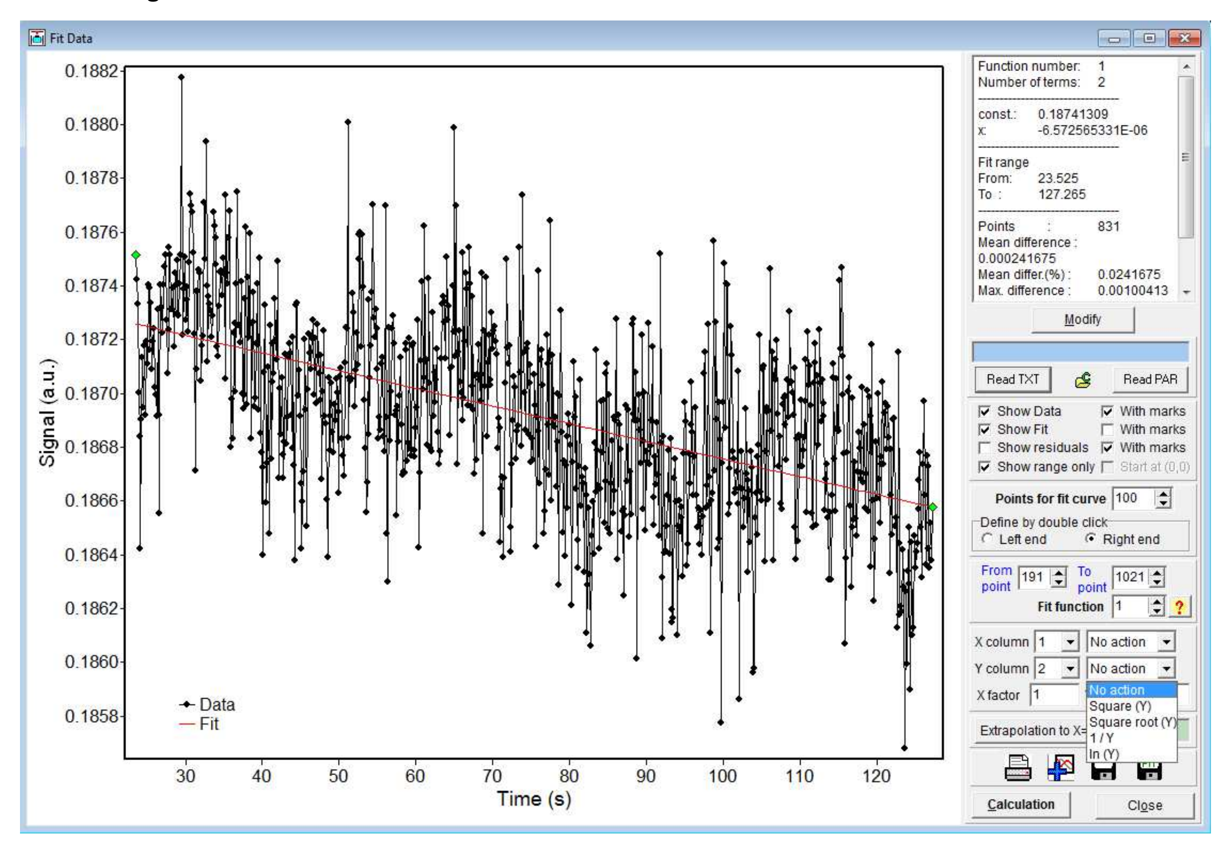


Abb. 125: Das Fenster Fit Data mit dem Wegsignal während einer Haltezeit von 120s und einem linearen Fit. Die X-Achse sind Mikrometer. Die mittlere Abweichung vom Fit beträgt 0,24nm.

Der erste und der letzte Punkt der Kurve werden nach dem Einlesen mit einem grünen Punkt markiert. Sie legen den Fitbereich fest. Die Zahl der Punkte wird außerdem in den Feldern **From point, To point** angezeigt. Durch Ändern der Werte in diesen Feldern kann der Fitbereich eingeschränkt werden. Außerdem kann er durch Doppelklick auf einen Punkt der Kurve definiert werden. Im Feld **Define by double click** ist vorher festzulegen, ob die untere Grenze (**Left end**) oder die obere Grenze (**Right end**) mit dem Klick definiert werden sollen.

Die Fitfunktion wird über das Feld **Fit function** festgelegt. In der aktuellen Version stehen 24 Funktionen zur Verfügung (siehe Kapitel 8.4). Der Typ der aktuellen Fitfunktion kann auch durch Klick auf das Fragezeichen angezeigt werden.

Die Rechnung wird mit **Calculation** gestartet. Anschließend ist die Fitfunktion als rote Linie zu sehen und die Ergebnisse werden im rechts oben im Fenster angezeigt (s. Abb. 125). Zusätzlich lässt sich mit **Show residuals** die Abweichung vom Fit als blaue Kurve darstellen.

Wenn der Fitbereich eingeschränkt wurde, ist trotzdem weiterhin die volle Kurve zu sehen. Mit **Show range only** kann das verhindert werden, so dass nur noch Punkte im Fitbereich dargestellt werden (s. Abb. 126).

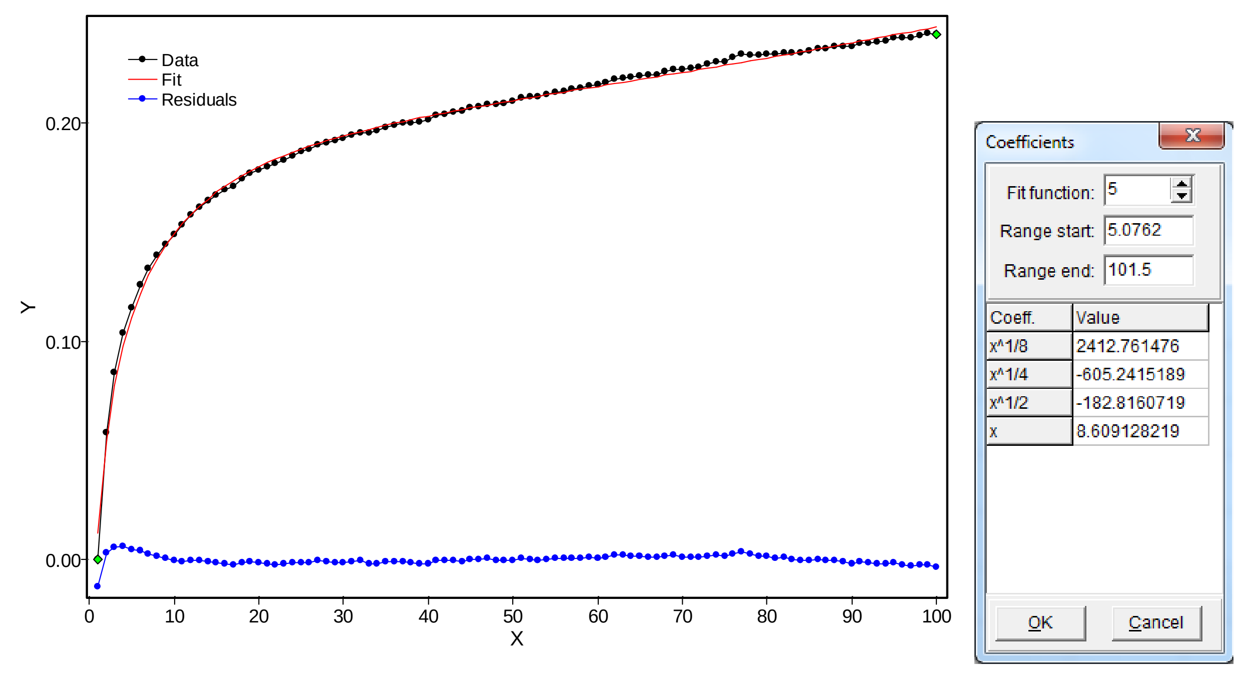


Abb. 126: Darstellung der Daten, der Fitkurve (rot) und der Abweichung vom Fit (blau). Rechts das Fenster zur Änderung der der Koeffizienten und des Fitbereichs.

Nachdem ein Fit durchgeführt wurde, kann das Ergebnis über die Schaltfläche in einem Parameterfile mit der Endung **PAR** abgespeichert werden. Dabei handelt es sich um ein einfaches Textfile in dem die Funktionsnummer, die Zahl der Terme, die Koeffizienten und der Fitbereich gespeichert sind. Ein solches File kann über **Read PAR** wieder eingelesen werden. Anschließend wird nur die Fitfunktion (ohne Daten) dargestellt.

Mit der Schaltfläche **Modify** lässt sich das Fenster **Coefficients** öffnen (Abb. 126) in dem alle Daten zum Fit angegeben werden und in dem sie geändert werden können. Dadurch lässt sich zum Beispiel eine andere Fitfunktion wählen oder es lässt sich der Fitbereich ändern. Mit OK wird die Änderung übernommen und sofort ausgeführt.

8 Erläuterung der Ergebnisse und Formeln

8.1 Erläuterung der Ergebnisse von Härtemessungen

Symbol	Erläuterung
N	Nummer der Messung, wenn mehrere Messungen gleichzeitig ausgewertet werden
Cycle	Zyklusnummer bei Messungen mit mehreren Be- und Entlastungszyklen, bei denen für jeden Zyklus Härtewerte berechnet werden können.
X	Relative X-Koordinate der Messung bezogen auf den Nullpunkt
Y	Relative Y-Koordinate der Messung bezogen auf den Nullpunkt
Z	Relative Z-Koordinate der Messung bezogen auf den Nullpunkt
Sno	Probennummer als ganzzahliger Wert
F	Maximale Prüfkraft (Normalrichtung) einer Messung oder eines Zyklus
h	Maximale Eindringtiefe bei wirkender Prüfkraft
H	Eindringhärte H_{IT} (Indentation hardness) als Kraft durch Kontaktfläche unter Last $H = \frac{F}{A_C(h_C)}$
E	Elastischer Eindringmodul $E_{IT.}$ Es gilt $E = \frac{(1-\nu^2)}{\frac{1}{E_r} - \frac{(1-\nu_i^2)}{E_i}}$ Unter idealen Umständen ist er identisch zum Elastizitätsmodul. Deutliche Unterschiede zwischen dem elastische Eindringmodul E_{IT} und dem E-Modul können bei Aufwölbung und Einsinken auftreten.
Er	Reduzierter Modul des Eindringkontaktes Er wird berechnet aus der Kontaktfläche **Ac** und der Kontaktsteife **S** nach $E_r = \frac{\sqrt{\pi}}{2 \cdot \beta} \cdot \frac{S}{\sqrt{A_C}}$. Der beta-Faktor ist ein Korrekturfaktor, der üblicherweise 1 sein sollte. Er kann in der Konfiguration festgelegt werden.
E*	Plain strain Modul $E^* = \frac{E}{1-\nu^2}$
ns	Poissonzahl der Probe (Annahme) Der Standardwert für die Auswertung wird in der Konfiguration festgelegt. Im Ergebnisfenster kann der Wert für die jeweilige Messung geändert werden.
Ei	E-Modul des Eindringkörpers (Indenters). Für Diamant gilt E=1141 GPa. Siehe dazu:

	J. E. Field and R. H. Telling, Research Note *The Young modulus and Poisson ratio of diamond*, PCS, Cavendish Laboratory, Dep. Of Physics, Madingly Road, Cambridge, CB3 OHE, UK, February 1999
ni	Poisson-Zahl des Eindringkörpers (Indenters). Für Diamant gilt ni=0.07 Siehe dazu die Angabe bei Ei.
HM	Martenshärte $HM = \frac{F}{26.43 \cdot h^2}$ (Kraft durch wahre Kontaktfläche) Die Martenshärte wird aus der maximalen Tiefe unter wirkender Prüfkraft bestimmt. Sie enthält die plastischen und elastischen Anteile der Verformung und kann somit nicht direkt mit H_{IT} verglichen werden. Je nach Elastizität des Materials kann die Rangfolge der Martenshärte von der der Vickers- oder Eindringhärte abweichen, die nur plastische Deformationsanteile berücksichtigen. Auch bei rein elastischer Deformation ergibt sich ein Wert für die Martenshärte.
HMs	Martenshärte, bestimmt aus der Steigung der Kraft/Eindringtiefe-Kurve An homogenen Werkstoffen (Ausmaß der Inhomogenitäten an der Oberfläche sind klein im Verhältnis zur Eindringtiefe) ergibt sich für die Kraft/Eindringtiefe-Kurve, zumindest in Teilbereichen (bevorzugt zwischen 50 % F_{max} und 90 % F_{max}), die Gleichung: $h = m \cdot \sqrt{F}$ Die Steigung *m wird* durch eine lineare Regression bestimmt. In diesem Fall kann die Härte nach folgender Formel aus der Kraft/Eindringtiefe-Kurve bestimmt werden: $HM_s = \frac{h^2}{m^2 \cdot A_c}$. Beim Vickers- und modifiziertem Berkovich-Indenter gilt A_S/h^2=26.43 mit A_s als Kontaktfläche der Oberfläche (Mantelfläche)
HV	Äquivalente Vickershärte Die Eindringhärte H_{IT} kann mit der Vickershärte *HV* auf einem weiten Gebiet der Werkstoffe korreliert werden, indem eine geeignete Umwertungsfunktion angewendet wird. H_{IT} ist zur Vickers-Härte durch einen Skalenfaktor in Bezug gesetzt. Für einen Vickers-Indenter gilt HV= H_{IT} *0.927184 für das Verhältnis der projizierten Fläche zur tatsächlichen Oberfläche (Mantelfläche). Die Einheit der Vickershärte ist kp/mm², auch wenn sie bei der Härteangabe nicht angegeben wird. Durch die Einheitenumrechnung unter Berücksichtigung der Fallbeschleunigung ergibt sich bei Angabe von H_{IT} in [GPa] and HV in [kp/mm^2]: HV = 0.094546 H_{IT} Bei einem modifiziertem Berkovich-Indenter beträgt der Faktor 0.0926
Creep	Absolutes Eindringkriechen als Tiefendifferenz zwischen Beginn der Entlastung und Ende der Belastung
CIT	Eindringkriechen, relative Eindringtiefenänderung während der Haltezeit bei Maximallast als Creep/h*100 [%]
RIT	Eindringrelaxation (Relative Prüfkraftänderung) bei Haltezeiten unter Wegsteuerung (der Weg wird konstant gehalten)
Wtot	Aufgewendete mechanische Arbeit Sie wird berechnet aus der Fläche unter der Belastungskurve einschließlich der Tiefenänderung während des Kriechens bei Maximalkraft.
We	Elastische Rückverformungsarbeit

	Sie wird berechnet aus der Fläche unter der Entlastungskurve
NIT	Elastischer Anteil der Eindringarbeit We/Wtot in Prozent
Y	Abschätzung der Fließgrenze der Materialien mit der iterativen Formel $\frac{H}{Y} = 1.15 + 2/3 \cdot \ln\left(\frac{E_r}{Y} \cdot \frac{\tan(\alpha)}{3}\right)$ die sich aus dem Expanding Cavity Modell ergibt. Alpha ist der Winkel zwischen Indenter und Oberfläche (19.7°). Der Wert für H/Y wird auf das Maximum von 5 begrenzt.
Wp	Arbeit, die für plastische Deformation aufgewendet wurde als Wp=Wtot-We
Rpl	Abschätzung für den Radius der plastischen Zone um den Eindruck mit der Formel: $R_{pl} = \frac{c \cdot a}{2^{3/2}} \cdot \sqrt{\frac{E}{H}} \cdot \tan^{1/3}(\alpha)$ Gilt nur für Vickers- oder Berkovich-Indenter Siehe [B. R Lawn, A. G. Evans, D. B. Marshall, Journal American Ceramic Soc., 63, (1980) 574]
µ	Reibwert zwischen Indenter und Probe
S	Kontaktsteife der Probe als Mittelwert der beiden Werte S1 und S2. Dieser Wert wird für die weitere Berechnung verwendet.
S1	Kontaktsteife der Probe bei Maximalkraft. Sie wird berechnet aus der ersten Ableitung des Fits der Entlastungskurve mit einem Polynom zweiten oder dritten Grades (Fitfunktion 2 oder 3)
S2	Kontaktsteife der Probe bei Maximalkraft, berechnet mit einer anderen Methode. Sie wird berechnet aus der ersten Ableitung des Fits der Entlastungskurve mit einer Potenzfunktion $F = C \cdot (h - h_0)^m$. Der Exponent **m** wird für die Berechnung des variablen Epsilon-Faktors benötigt.
Sf	Gerätesteifigkeit (frame stiffness) in **normaler** Richtung als inverser Wert der Gerätenachgiebigkeit Cf
Sfl	Gerätesteifigkeit (frame stiffness) in **lateraler** Richtung
m	Exponent der Entlastungskurve aus der Formel $F = (h - h_0)^m$
eps	Epsilon Faktor $\varepsilon = m \cdot \frac{h_S}{h_{max} - h_0}$ Er beschreibt das Verhältnis zwischen der elastischen Deformation oberhalb der Kontaktfläche **hs** und unterhalb der Kontaktfläche **h-h0** (ohne Beachtung plastischer Anteile). Es existiert ein Zusammenhang zwischen Epsilon und dem Exponent der Entlastungskurve **m**, der für eine genauere Berechnung des Epsilon Wertes verwendet wird. Es gilt: ε = 1 bei m = 1 (flacher Stempel) ε = 0.75 bei m = 1.5 (Kugel) ε = 0.727 bei m = 2 (spitzer Kegel).

	Für reale Materialien kann ε nach einer komplizierten Funktion zwischen 0.8 und 0.7 liegen. Die Herleitung des Wertes für ε erfolgte bisher nur für rein elastische Deformationen. Bei zusätzlicher plastischer Deformation ist der ε nach wie vor nur ein Schätzwert. In ISO 14577 wird daher ε = 0.75 empfohlen. In diesem Programm wird ε mit Hilfe des Exponenten der Entlastungskurve genauer berechnet, wenn unter **Configuration/Analysis normal** diese Option gewählt ist.
hc	Tiefe des Kontaktes des Eindringkörpers mit der Probe bei F_{max} Es gilt: $h_C = h_{max} - \varepsilon \cdot \frac{F}{S}$
hs	Elastische Deformation der Oberfläche oberhalb der Kontaktfläche hs = h - hc
hr	Schnittpunkt der Tangente an die Entlastungskurve bei Maximalkraft mit der Tiefenachse
h0	Bleibende Eindringtiefe nach Rücknahme der Prüfkraft
h0f	Bleibende Eindringtiefe nach Rücknahme der Prüfkraft, die mit Hilfe einer Fitfunktion auf eine Kraft von Null extrapoliert wurde. Dieser Wert wird für die Berechnung der Energien verwendet, da er genauer ist als hf.
hi	Elastische Deformation des Gerätes durch die Gerätenachgiebigkeit (inverse Gerätesteife) hi=F/Si
a	Äquivalenter Kontaktradius bei Pyramiden-Indentern. Es wird ein rotationssymmetrischer Kontakt angenommen so dass gilt: $a = \sqrt{\frac{A_C}{\pi}}$
ur	Relative elastische radiale Deformation (normiert mit dem Kontakradius **a**), berechnet nach der Formel $u_r = \frac{(1-2\nu)(1+\nu)}{2} \frac{H}{E} \cdot \cos(\alpha_r)$ mit α als mittlerem Winkel zwischen (waagerechter) Oberfläche und Oberfläche des verbleibenden Eindrucks. Dieser Wert wird verwendet um mit der **Radial Displacement Correction** die Kontaktfläche genauer zu berechnen. Die Nutzung der Radial Displacement Correction wird unter **Configuration/Analysis normal** festgelegt.
Ap	Projizierte Kontaktfläche des Eindringkörpers bis zum Abstand h_c von der Spitze **ohne** Berücksichtigung der Radial Displacement Correction. Ac ergibt sich aus der Flächenfunktion des Indenters für die Tiefe hc. Sie entspricht der (projizierten) Fläche des Eindrucks nach Entlastung bei einer ideal flachen Oberfläche (kein pile up oder sink in).
Ac	Projizierte Kontaktfläche des Eindringkörpers bis zum Abstand h_c von der Spitze **mit** Berücksichtigung der Radial Displacement Correction. Ac ist etwas kleiner als Ap da die elastische Deformation unter Last nach innen zum Zentrum des Eindrucks gerichtet ist. Ac ergibt sich aus der Flächenfunktion des Indenters für die Tiefe hc.
R	Effektiver (tiefenabhängiger) Radius des kugelförmigen Eindringkörpers
Cs	Kriechrate beim Start des Kriechens nach Erreichen der Maximalkraft

Ce	Kriechrate am Ende des Kriechsegments vor Beginn der Entlastung
C0	Koeffizient 1 des Fits der Kriechkurve mit einer logarithmischen Funktion $\Delta h = C_0 \cdot \ln(C_1 \cdot t + 1)$ t – Kriechzeit
C1	Koeffizient 2 des Fits der Kriechkurve mit einer logarithmischen Funktion
Rul/Rc	Verhältnis aus Entlastungsrate zum Beginn der Entlastung (die ersten 20% der Entlastungskurve) und Kriechrate am Ende des Kriechsegments. Dieses Verhältnis wird dazu verwendet, den noch vorhandenen Einfluss des Kriechens auf die Steifeberechnung zu bewerten. Es sollte größer als 20 sein.

8.2 Erläuterung der Ergebnisse von Scratchtests

Symbol	Description
N	Nummer der Messung, wenn mehrere gleichzeitig ausgewertet werden
Fn	Maximale Prüfkraft in Normalrichtung während eines Scratchtests
hl	Maximale laterale Verschiebung (normalerweise die Position, wo Fn erreicht wird)
	Die folgenden Rauigkeitsparameter werden von einer ersten Oberflächenrasterung mit niedriger Kontaktkraft vor einem Scratchtest erhalten.
Ra	Arithmetischer Mittelwert der Rauigkeit entlang der Scratchlänge (vor dem Scratchtest)
Rq	Mittlerer Effektivwert der Rauigkeit entlang der Scratchlänge (vor dem Scratchtest)
Rt	Maximalhöhe des Rauigkeitsprofils entlang der Scratchlänge als Differenz zwischen maximaler Peakhöhe und maximaler Muldentiefe
Rp	Maximale Peakhöhe des Rauigkeitsprofils entlang der Scratchlänge
Rv	Maximale Muldentiefe des Rauigkeitsprofils entlang der Scratchlänge
µ_av	Mittlere Reibung entlang der Scratchlänge
µ_max	Maximale Reibung während eines Scratchtests
h_p	Maximale plastische Deformation als größte Höhendifferenz zwischen letztem und erstem Oberflächenscan.
hm_ul	Maximale Verschiebung in Normalrichtung unter Last

hm_au	Maximale Verschiebung in Normalrichtung nach Entlastung (maximale Tiefe des letzten Oberflächenscans)
dh_lu	Maximale Tiefendifferenz zwischen dem Scan unter Last und nach der Entlastung = Differenz zwischen hm_ul und hm_au
X_pl	Laterale Position für den Beginn der plastischen Deformation (falls nachweisbar)
Fn_pl	Normalkraft für den Beginn der plastischen Deformation (falls nachweisbar)
µ_pl	Reibungskoeffizient für den Beginn der plastischen Deformation (falls nachweisbar)
X_1	Laterale Position für das vordefinierte Tiefenlimit 1 unter Last. Das Tiefenlimit ist im Konfigurationsfenster definiert, Seite **Analysis lateral**.
Fn_1	Normalkraft für das vordefinierte Tiefenlimit 1 unter Last
µ_1	Reibungskoeffizient für das vordefinierte Tiefenlimit 1 unter Last
X_2	Laterale Position für das vordefinierte Tiefenlimit 2 der zurückbleibenden Tiefenänderung. Das Tiefenlimit ist im Konfigurationsfenster definiert, Seite **Analysis lateral**.
Fn_2	Normalkraft für das vordefinierte Tiefenlimit 2 der zurückbleibenden Tiefenänderung.
µ_2	Reibungskoeffizient für das vordefinierte Tiefenlimit 2 der zurückbleibenden Tiefenänderung.
X_f	Laterale Position für den ersten Bruch, angezeigt durch eine deutliche Stufe in der Tiefenkurve unter Last
Fn_f	Normalkraft für den ersten Bruch (falls nachweisbar)
µ_f	Reibungskoeffizient für den ersten Bruch (falls nachweisbar)
Slope	Oberflächenneigung in der Scratchrichtung, erhalten aus dem ersten Oberflächenscan vor dem Scratchtest

8.3 Fehlerberechnung

Wenn nicht anders angegeben, wird immer der statistische Fehler angezeigt. Zu systematischen Fehlern werden keine Aussagen gemacht. Der statistische Fehler wird aus der Standardabweichung entsprechend einer Student-Verteilung berechnet.

$$\Delta x = \frac{t \cdot \sigma}{\sqrt{n}}$$

t(n) - Studentfaktor
σ - Standardabweichung
n - Anzahl der Messungen

Fehlerbeiträge durch Ungenauigkeiten in der Kraft- oder Wegkalibrierung, der Gerätesteife oder Nachgiebigkeit oder der Flächenfunktion werden nicht berücksichtigt. Diese systematischen

Fehlerbeiträge kompensieren sich teilweise gegenseitig und es ist sehr schwierig eine Obergrenze für den systematischen Fehler anzugeben.

Der relative Fehler der Kontaktsteife $\Delta S/S$ ergibt sich aus der Formel:

$$\frac{\Delta S}{S} = \frac{\Delta h_{max}}{h_{max}} + \frac{\Delta F_{max}}{F_{max}} + \frac{\Delta S_{sys}}{S} + \frac{\Delta h_U}{h_{max}}$$

ΔS_{sys} – wird bei normalen Härtemessungen (ohne Dynamik) aus den zwei verschiedenen Fitmethoden der Entlastungskurve bestimmt. Die Hälfte des Unterschiedes für S zwischen beiden Fitmethoden wird als Maß für den Fehler durch die Fitmethode verwendet. $\Delta S_{sys} = |S1\text{-}S2|/2$

ΔF_{max} – ist der statistische Fehler der Kraftmessung bei Maximalkraft

Δh_{max} – ist der statistische Fehler der Wegmessung bei Maximalkraft

Δh_U – ist der Mittelwert der statistischen Fehler der Wegmessung über alle Werte im Fitbereich der Entlastungskurve (üblicherweise zwischen 40% und 98%). Er ist meist sehr ähnlich zu Δh_{max}

Δh_c – der statistische Fehler der Kontakttiefe ergibt sich zu:

$$\Delta h_c = \Delta h_{max} + \frac{\varepsilon}{S} \cdot \Delta F_{max} + \frac{\varepsilon \cdot F}{S^2} \cdot \Delta S$$

Δh_s – der relative Fehler der elastischen Oberflächendeformation h_s ist

$$\frac{\Delta h_S}{h_S} = \frac{\Delta S}{S} + \frac{\Delta F_{max}}{F_{max}}$$

ΔH – der relative Fehler der Eindringhärte ergibt sich zu

$$\frac{\Delta H}{H} = \frac{\Delta F_{max}}{F_{max}} + 2 \cdot \frac{\Delta h_c}{h_c}$$

Es wird angenommen, dass der relative Fehler der äquivalenten Vickershärte genauso groß ist, wie derjenige der Eindringhärte.

ΔHM – der relative Fehler der Martenshärte ergibt sich zu

$$\frac{\Delta HM}{HM} = \frac{\Delta F_{max}}{F_{max}} + 2 \cdot \frac{\Delta h_{max}}{h_{max}}$$

ΔE – der relative Fehler des absoluten und relativen Eindringmoduls ergibt sich zu

$$\frac{\Delta E_r}{E_r} = \frac{\Delta S}{S} + \frac{\Delta h_c}{h_c}$$

ΔA – der relative Fehler der Kontaktfläche beträgt

$$\frac{\Delta A}{A} = 2 \cdot \frac{\Delta h_C}{h_C}$$

Δa – der relative Fehler des äquivalenten Kontaktradius entspricht dem relativen Fehler der Kontakttiefe wenn der systematische Fehler der Kontaktflächenberechnung nicht berücksichtigt wird.

Für die anderen Werte wird in der aktuellen Programmversion keine Fehlerangabe gemacht.

8.4 Fitfunktionen

Im Programm gibt es eine Anzahl fest eingestellter Funktionen, die zum Beschreibung der Flächenfunktion oder der Steifefunktion genutzt werden und mit denen beliebige Daten im Fenster **Tools / Fit data window** gefittet werden können. Die Funktionen sind mit einer laufenden Nummer gekennzeichnet.

Die Tabelle gibt alle in dieser Version verfügbaren Funktionen an.

Wenn im Programm das Symbol ? zu sehen ist, können die einzelnen Terme der Funktionen angezeigt werden. Das Zeichen **^** bedeutet dabei **Potenz**.

No	Function
1	$y = C_1 + C_2 \cdot x$
2	$y = C_1 + C_2 \cdot x + C_3 \cdot x^2$
3	$y = C_1 + C_2 \cdot x + C_3 \cdot x^2 + C_4 \cdot x^3$
4	$y = C_1 \cdot x^{3/2}$
5	$y = C_1 \cdot x^{1/8} + C_2 \cdot x^{1/4} + C_3 \cdot x^{1/2} + C_4 \cdot x$
6	$y = C_1 \cdot x^{1/2} + C_2 \cdot x + C_3 \cdot x^{3/2} + C_4 \cdot x^2$
7	$y = C_1 \cdot x^{1/8} + C_2 \cdot x^{1/4} + C_3 \cdot x^{1/2} + C_4 \cdot x + C_5 \cdot x^{3/2}$
8	$y = C_1 + C_2 \cdot x^{1/4} + C_3 \cdot x^{1/2} + C_4 \cdot x + C_5 \cdot x^{3/2}$
9	$y = C_1 \cdot x^{1/16} + C_2 \cdot x^{1/8} + C_3 \cdot x^{1/4} + C_4 \cdot x^{1/2} + C_5 \cdot x + C_6 \cdot x^{3/2} + C_7 \cdot x^2$
10	$y = C_1 + C_2 \cdot x^{1/8} + C_3 \cdot x^{1/4} + C_4 \cdot x^{1/2} + C_5 \cdot x + C_6 \cdot x^{3/2} + C_7 \cdot x^2$
11	$y = C_1 \cdot x^{1/32} + C_2 \cdot x^{1/16} + C_3 \cdot x^{1/8} + C_4 \cdot x^{1/4} + C_5 \cdot x^{1/2} + C_6 \cdot x + C_7 \cdot x^{3/2} + C_8 \cdot x^2$
12	$y = C_1 \cdot x^{1/64} + C_2 \cdot x^{1/32} + C_3 \cdot x^{1/16} + C_4 \cdot x^{1/8} + C_5 \cdot x^{1/4} + C_6 \cdot x^{1/2} + C_7 \cdot x + C_8 \cdot x^{3/2} + C_9 \cdot x^2$
13	$y = C_1 + C_2 \cdot x + C_3 \cdot x^2 + C_4 \cdot x^3 + C_5 \cdot x^4$
14	$y = C_1 + C_2 \cdot x + C_3 \cdot x^2 + C_4 \cdot x^3 + C_5 \cdot x^4 + C_6 \cdot x^5$
15	$y = C_1 \cdot x^{1/64} + C_2 \cdot x^{1/32} + C_3 \cdot x^{1/16} + C_4 \cdot x^{1/8} + C_5 \cdot x^{1/4} + C_6 \cdot x^{1/2} + C_7 \cdot x + C_8 \cdot x^2$
16	$y = C_1 + C_2 \cdot x^{1/2} + C_3 \cdot x + C_4 \cdot x^{3/2} + C_5 \cdot x^2$
17	$y = C_1 \cdot x^2$
18	$y = C_1 \cdot x + C_2 \cdot x^2$
19	$y = C_1 \cdot x + C_2 \cdot x^2 + C_3 \cdot x^3$
20	$y = C_1 + C_2 \cdot x + C_3 \cdot x^{-1}$

21	$y = C_1 + C_2 \cdot x + C_3 \cdot x^2 + C_4 \cdot x^{-1} + C_5 \cdot x^{-2}$
22	$y = C_1 \cdot x^{2/3}$
23	$y = C_1 - C_2 \cdot \left(1 - e^x\right)$
24	$y = C_1 \cdot \left(1 - e^x\right)$

Funktion 12 wird oft zur Beschreibung der Flächenfunktion nach der Oliver & Pharr Methode verwendet und kommt beispielsweise beim Nanoindenter XP /G200 zum Einsatz.

8.5 Empfohlene Literatur

1) ISO 14577-1:2002: Metallic materials - Instrumented indentation test for hardness and materials parameters. Part 1: Test method. CEN (2002).

2) W. C. Oliver, G. M. Pharr: An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments. J. Mater. Res. Vol. 7, No. 6, 1564-1583 (1992

3) T. Chudoba, N. M. Jennett: Higher accuracy analysis of instrumented indentation data obtained with pointed indenters. J. Phys. D: Appl. Phys. 41 215407 (2008).

4) K. L. Johnson: Contact mechanics, Cambridge University Press, 1985

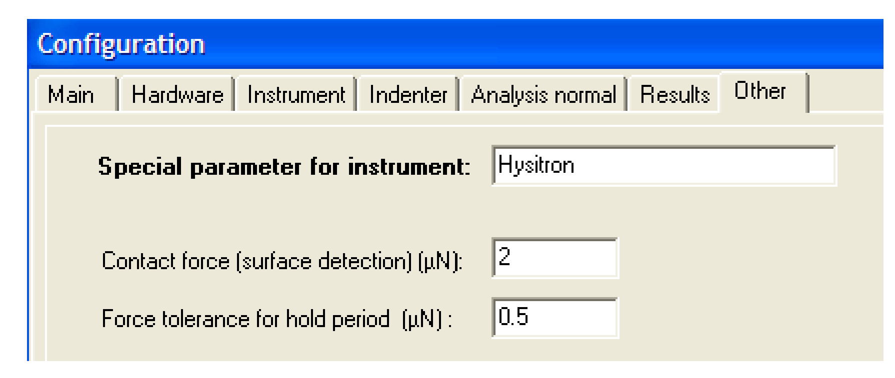
5) Antony C. Fischer-Cripps, Nanoindentation, Springer, NY, 2002.

6) Antony C. Fischer-Cripps, Contact Mechanics, Springer

9 Das Rohdatenformat der verschiedenen Geräte

9.1 Einleitung

Der Importfilter versucht, automatisch für alle Geräte die verschiedenen Segmente Belastung, Kriechen, Entlastung und Haltezeit zu erkennen. Bei einigen Geräten wird das Ende eines Segments im Datenfile angezeigt, jedoch müssen Anfang und Ende einer Halteperiode meist durch Suchen von Daten mit annähernd konstanter Kraft festgestellt werden. Dies hängt vom Rauschen des Kraftsignals ab. Es ist deshalb wichtig, korrekte Parameter für **Force tolerance for hold period** (Krafttoleranz für die Halteperiode) und **Contact force (surface detection)** (Kontaktkraft für die Oberflächenfindung) auf der Seite **Other** des Konfigurationsfenster einzusetzen.



Bei der Auswahl eines Gerätes werden bereits sinnvolle Werte gesetzt. Eine Optimierung der Parameter kann jedoch notwendig sein.

9.2 Nanoindenter XP/G200-Daten

Es können nur ASCII-Datenfiles von Nanoindenter XP mit oder ohne DCM-Kopf gelesen werden. Sie können auch Daten der kontinuierlichen Steifigkeit (continuous stiffness - CSM) enthalten. Die Dateiendung sollte **TXT** oder **CSV** sein. Eine andere Dateiendung kann in der Konfiguration auf der Seite *Instrument* eingestellt werden. Die Bedeutung der Datenspalten muss im Dateikopf (file header) erklärt werden. Die Spalten können in beliebiger Ordnung angeordnet sein, ihre Bedeutung muss aber in den Schlüsselwörtern (key words) angegeben sein:

"DisplacementIntoSurface ", "LoadOnSample ", "_Time " or "TimeOnSample", "Stiffness "

Ein Beispiel für den Dateikopf (file header) ist:

```
"Channel Data"
"SegmentIndex  ","_Time  ","DisplacementIntoSurface  ","LoadOnSample  ","Stiffness  ","Modulus
","Hardness "
"Segment Number ","Time ","Displacement Into Surface ","Load On Sample ","Stiffness ","Modulus
","Hardness "
"","s","nm","mN","N/m","GPa","GPa"
0,48.200,-1860.143,0.004990,****,****,****
0,48.400,-1855.408,0.004958,****,****,****
```

Beispiel-Datenfiles werden mit dem Programm mitgeliefert. Die Maßeinheiten der Spalten werden in der letzten Überschriftzeile angegeben. Es sind nur SI-Einheiten erlaubt.

(nm, µm (um), mm, µN, mN, N, s).

Stimmen Sie bitte Ihre Nanoindenter XP- Routine Export sample entsprechend dieser Forderungen ab.

Die Vorgehensweise ist unten beschrieben.

Für den Export der ASCII-Daten Gehen Sie in der TestWorks®-Software wie folgt vor:

Gehen Sie zum Hauptmenü *Define*

Auf der Seite *Configuration* muss die Routine *Sample Export* installiert werden. Drücken Sie die linke Maustaste, wenn dies nicht der Fall ist und verwenden Sie *Insert Configuration Item.* Fügen Sie den Begriff Sample Export ein.

Der Modul *Test Export* wird erscheinen (beachten Sie den unterschiedlichen Namen im Vergleich zu Sample Export). Legen Sie die folgenden Eigenschaften auf dieser Seite fest:

Export Template: Drücken Sie *Browse*. Verwenden Sie den File *MTS Nano Test Export*.

File Mode: Verwenden Sie Auto-Increment. Jeder exportierte File erhält eine anwachsende Zahl am Ende.

Destination: File

Export Filename: Verwenden Sie einen charakteristischen Filenamen für die Messung. Sie sollten den Filenamen bei jedem Datenexport für eine andere Probe ändern.

Gehen Sie dann zur Seite *Channels:*

Drücken Sie die Schaltfläche *Export order.* Nutzen Sie die Pfeiltasten, um die Spalten entsprechend dem obigen Beispiel anzuordnen.

Sie können auch den *.MSM-File der TestWorks®-Methode im Verzeichnis Examples/Nanoindenter XP des IndentAnalyser-Installationspfades verwenden.

9.3 UMIS-2000-Daten

DOS Softwareversion

Der originale **DAT**-File kann im binären Format eingelesen werden. Falls ein File mit Kriechdaten **CRP** und eine zweite Haltezeit am Ende der Messung im Format **QMW** mit derselben Filenummer existieren, werden sie zusammen mit dem *.DAT-File eingelesen. Zusätzliche Informationen werden aus dem **NAM**-File erhalten. Er **muss** sich in demselben Pfad befinden. Beispiel-Datenfiles werden mit der Software mitgeliefert.

Achtung: Wenn Ihre Software andere Dateierweiterungen verwendet, nehmen Sie bitte Kontakt zum Software-Lieferanten auf.

CRP- und QMW-Files liegen im ASCII-Format mit folgender Struktur vor:

```
"19:34:55","01-18-2002","Depth, Force"
    0.02,   616.79, 50.00296
    0.07,   617.10, 50.00254
```

Das Messdatum wird aus dem Datum des NAM-Files erhalten und nicht aus der ersten Zeile des ASCII-Files. Zyklische Messungen (entwickelt für Kugelindenter) besitzen die Dateierweiterung **ALT**.

WinUMIS Softwareversion

Die Original-Datenfiles mit einer aus drei Ziffern bestehenden Dateierweiterung können eingelesen werden. Zusätzlich wird ein **PAR**-File mit demselben Namen eingelesen, das weitere Messinformationen enthält. Er muss sich in demselben Pfad befinden.

Normalerweise werden nur Files mit gleicher erster Ziffer der Dateierweiterung (zum Beispiel 0 für die ersten 100 Files 000-099) im Fileauswahldialog angezeigt, um die Anzahl der sichtbaren Filenamen zu begrenzen. Sie müssen den Filetyp in der Auswahlzeile ändern, um die nächsten 100 Filenamen (100-199) zu sehen usw.

WinUMIS2-Datenfiles liegen im ASCII-Format mit folgender Struktur vor:

Erste Zeile:

```
Fused Silica LP2-5 MB2 100mN.000;0;0;0;0;0;(0:0:0);21.01.02:15:18:57; False;0;LP2-5;;;;;,Time,P (mN),ht (um),Stiffness (dP/dh),Lateral Force (mN),Lateral Position (um),P,ht,unused,hp,a/R,dP/dh,E*,H, unused, unused, unused,unused,unused
```

Zweite Zeile:

```
IC,0,-4.35655855910443E-03,-2.85595325398774E-04,0, , , , , , , , , , , , ,
```

Dritte und folgende Zeilen

```
Loading,2.25,2.95093053589148E-03,1.2225058137157E-03,0,0,0, , , , , , , ,
Loading,4.51000000000204,4.24044269080789E-02,3.89028786499682E-03,0,0,0,,,
```

Der Segmenttyp ist durch das erste Wort in jeder Reihe gekennzeichnet. Die Anordnung der Zahlen muss wie folgt sein:

Time, Force (P), depth (ht) – Zeit, Kraft (P), Tiefe (ht).

Zusätzliche Spalten werden nicht eingelesen.

9.4 Fischerscope-Daten

DOS Softwareversion

Es können nur ASCII-Daten eingelesen werden. Nutzen Sie das Exportprogramm der Gerätesoftware. Es wird empfohlen, alle Files einer Serie mit gleicher Last in einem ASCII-File abzuspeichern und die Dateierweiterung *.DAT zu verwenden. Eine andere Dateiendung kann in der Konfiguration auf der Seite *Instrument* eingestellt werden. Es wird sehr empfohlen, das *Profi output protocol* zu verwenden.

Für die Verwendung von Daten im Lastbereich unter 0.4mN muss das *Output Protocol* mit dem Menü *Supervisor/Change Protocol* geändert werden. Fügen Sie die Kommandozeile *@NPKB* vor den Output-Kommandos für die Messdaten ein.

Einige ASCII-Datenfiles werden mit dem Programm im Beispielverzeichnis mitgeliefert. Falls Sie Probleme mit dem Datenimport haben, prüfen Sie die Struktur des Datenfiles mit einem ASCII-Editor und versuchen Sie, dieselbe Filestruktur mit Ihrem Protokoll zu reproduzieren.

Es folgt ein Beispiel. Nach der Zeile „Nullpunktbestimmung“ folgen die Daten unter 0.4mN. Das Belastungssegment folgt nach dem Wort „Krafterhöhung“. Dieses Wort wird für die Erkennung des Belastungssegments verwendet.

Achtung: Wenn die Fischerscope-Software andere Sprachen verwendet, wird der Datenimport nicht funktionieren. In diesem Fall nehmen Sie bitte Kontakt zum Lieferanten auf und senden Sie einen Ihrer ASCII-Datenfiles.

```
Applikation: Kalibration-300            Datum: 06/03/2002  Uhrzeit: 18:56

Messung  Datum: 06/03/2002  Uhrzeit: 12:18
Laufende Nr:    46
Kommentar  : FS 30mN-1

Indentor   : 1V14-02-02
letzte Formkorrektur  am 14/02/2002 um 17:45 Uhr
letzte Härtekorrektur am 19/02/2002 um 14:01 Uhr

Nullpunktbestimmung
-------------------

 Nr.   Kraft  Tiefe  Zeit
   1   0.020  0.000    -8.5
   2   0.041  0.001    -8.0
   3   0.061  0.002    -7.5
   4   0.081  0.002    -7.0
   5   0.102  0.004    -6.5
   6   0.122  0.003    -6.0
   7   0.142  0.005    -5.5
   8   0.163  0.004    -5.0
   9   0.183  0.005    -4.5
  10   0.203  0.005    -4.0
  11   0.224  0.007    -3.5
  12   0.244  0.007    -3.0
  13   0.264  0.007    -2.5
  14   0.285  0.008    -2.0
  15   0.305  0.009    -1.5
```

```
  16   0.325  0.009    -1.0
  17   0.346  0.010    -0.5
  18   0.366  0.010     0.0

Krafterhöhung
-------------

 Nr.    Kraft  Tiefe korr.Härte   Zeit
   1   0.386  0.010       7215   0.5
   2   0.508  0.015       6072   1.0
```

WINDOWS Softwareversion

Es können nur ASCII-Daten eingelesen werden. Nutzen Sie das Exportprogramm der Gerätesoftware. Es wird empfohlen, alle Files einer Serie mit gleicher Last in einem ASCII-File abzuspeichern und die Dateierweiterung **TXT** zu verwenden. Eine andere Dateiendung kann in der Konfiguration auf der Seite *Instrument* eingestellt werden.

Für die Verwendung von Daten im Lastbereich unter 0.4mN muss das Output Protocol geändert werden. Einige Datenfiles werden im Beispielverzeichnis mitgeliefert. Falls es Probleme mit dem Datenimport gibt, prüfen Sie die Struktur des Datenfiles mit einem ASCII-Editor und versuchen Sie, dieselbe Filestruktur mit Ihrem Protokoll zu reproduzieren.

Es folgen zwei Beispiele:

Beispiel 1:

Dieses Beispiel enthält Daten unter 0.4mN für die Nullpunktbestimmung. Sie liegen nicht im Standardausgabeformat vor. Zwischen diesen Daten und Daten oberhalb 0.4mN müssen mindestens zwei leere Zeilen liegen. Zwischen den Daten aus einer kompletten Messung und der nächsten Messung muss eine leere Zeile liegen.

```
Quarz 500 mN.hap   20.11.02  09:30:03
HM k  0.499971/     30.0/300=  3753.80
x=   35.610  y=   39.864
Kraft  [mN]   Tiefe  [um]   Zeit [sec] (Comment: this are data below 0.4mN
0.0419999     0.0043421     0.1         for zero point detection.
0.060948      0.00681055    0.2         They are not in the standard
0.0800863     0.00906338    0.3         format)
0.0990505     0.0108627     0.4
0.118009      0.0129148     0.5
0.136975      0.0146397     0.6
0.155938      0.0164985     0.7
0.175091      0.0181639     0.8
0.194059      0.0197997     0.9
0.213030.0213239      1
0.232  0.0229075      1.1
0.251157      0.0243202     1.2
0.270131      0.0257106     1.3
0.289107      0.0270712     1.4
0.308083      0.0283723     1.5
0.327059      0.0296809     1.6
0.346220.030982       1.7
0.365198      0.0322014     1.8
0.384176      0.0334505     1.9
0.403155      0.0346178     2

Kraft  [mN]   Tiefe  [um]   Zeit [sec]
0.422323      0.0356736     0.1
0.519255      0.0413614     0.2
```

Beispiel 2 ohne Daten unterhalb 0.4mN:

```
Untitled.hap   18.02.2002  16:21:05
HUkorr  0.100007/     30.0/300=   3989.4
x=     8.00  y=    12.94
F       h       t
4,205046e-001 2,415367e-002 1,000000e-001
7,530984e-001 3,961656e-002 2,000000e-001
1,085815e+000 5,067367e-002 3,000000e-001
1,418530e+000 6,173077e-002 4,000000e-001
1,751307e+000 7,057077e-002 5,000000e-001
2,084512e+000 7,941788e-002 6,000000e-001
```

9.5 Hysitron-Daten

Es können nur ASCII-Daten eingelesen werden. Die Dateierweiterung sollte TXT sein. Eine andere Dateierweiterung kann in der Konfiguration auf der Seite *Instrument* eingestellt werden. Der Dateikopf (file header) sollte aus 3 Zeilen bestehen. Die dritte Zeile enthält die Beschreibung der Datenspalten:

```
Depth (nm)     Load (µN)     Time (s)
0.000000       1.023817      0.000000
0.099956       1.007790      0.003000
```

Zusätzliche Textzeilen vor den Zahlen und weitere Spalten werden ignoriert.

Die Datenspalten müssen diese Anordnung mit den Einheiten (nm), (µN) und (s) aufweisen, andernfalls tritt ein Fehler auf. Die Filestruktur mit den Segmenten Belastung, Kriechen, Entlastung, Haltezeit wird automatisch erkannt.

9.6 Shimadzu DUH-202-Daten

Die Originaldateien mit den Fileerweiterungen **DA1** oder **DA2** im binären Format sind nicht lesbar sondern nur Daten im ASCII Format mit der Fileerweiterung **ASC**.

Nutzen Sie das Exportprogramm ASCII-Transformation der Gerätesoftware. Wählen Sie den *Save-Mode* mit der **F3**-Taste nach der Fileauswahl. Nach der korrekten Auswahl erscheint ein Stern (*) neben dem Härtemittelwert. Beantworten Sie die Frage nach der Anzahl der Punkte (Periode) immer mit Null (0 = Standard), um alle Punkte zu verwenden. Andernfalls erhalten Sie eine Fehlermitteilung.

Einige Beispiel-Dateien werden im Verzeichnis Data/Examples mitgeliefert. Die Filestruktur nach dem ASCII-Export sieht wie folgt aus:

```
"DUH-202 ASCII FILE"
"RTL","MOB","IDT","LUT","DUT"
"2","50","VICKERS","gf","um"

"TMD","SPN","SPB","TLD","LDS","AFT","FLD","MMO","MA2","MI2","CCT","PAN","PAV","TSP","TDS"
"2","Testprobe     ","8283-10         ","1.00","2","10","10","Diamant  Nr.  10  00","0.02","3","
","0.00","5","0.10"

"TCT","DCT","DAT","KLO","KDP","KHD","KLG","KLH","MXL","MXD","MXH","MID""MIH
"0","769","10/18/'101
09:35","1.0042","0.286","465","0.00","0.000","1.0042","0.286","465","0.139","1967",

"No","LOAD","DEPTH","CLOCK","TEMP"
1,0.0422,5.604,147.2,0.0
2,0.0424,5.627,147.3,0.0
```

9.7 Shimadzu DUH-201W-Daten

Es können **CSV** Dateien im ASCII-Format eingelesen werden. Die Dateikopf-Zeilen im File werden ignoriert. Der Start der Datenzeilen wird durch die Wörter **Raw data** erkannt.

```
,CSV File Version,,1001
,Indenter type,,Other
,Tip radius,,   0.000,um
,Hardness unit,,Dynamic hardness
,Read times,,1
,Objective lens,,40
,Folder for test data,,C:\DUH\Data
,Folder for ASCII data,,C:\DUH\Data

Test condition
,Test mode,,Load-unload
,Sample name,,S.S
,Sample No.,,
,Test force,,  10.000,mN
,Loading speed,,3,(    0.4740mN/sec)
,Hold time,,5,sec
,Test count,,5
,Parameter name,,Temp
,Parameter,,180
,Comment,,Shimadzu Corporation



Test result,¶ê-BM-14-10mN(1)
,Force,Depth1,Depth2,Depth3,Depth4,-1,-2,Elasticity,Length,
,mN,um,um,um,um,,,Pa,um,
,0.000000,0.148926,0.042114,0.103791,0.045135,0.000000,0.000000,0.000000,-----,-----



Raw data
74,Data no,Depth,Force,,Time
,,um,mN,,sec
,,    -1.929,    -0.008,,    -3.650
,,    -1.904,    -0.006,,    -3.600
,,    -1.878,    -0.007,,    -3.550
```

9.8 Nanotest-Daten

Es können nur ASCII-Daten gelesen werden. Die Dateierweiterung sollte **LDD** oder **TXT** sein. Eine andere Dateierweiterung kann in der Konfiguration auf der Seite *Instrument* eingestellt werden.

Der Dateikopf (file header) der **LDD**-Files muss aus 10 Zeilen bestehen. Die erste Zahl gibt die Anzahl der Messungen im File an. Die Zeit wird bei diesem Filetyp nicht mit exportiert. Wenn Zeitdaten nicht verfügbar sind, wird ein Zeitintervall von 0.1s zwischen zwei Punkten angenommen.

Bei den TXT-Dateien wird keine Kennung für die Spalten und keine Kopfzeilen exportiert. Daher kann die Reihenfolge von Kraft-, Weg- und Zeitdaten nicht identifiziert werden. Es kann im Fileauswahlmenü zwischen zwei Varianten gewählt werden: 1) Time-Force-Depth (Zeit – Kraft – Tiefe)

2) Depth-Force- Time (Tiefe – Kraft – Zeit)

Eventuell muss der korrekte Typ ausprobiert werden. Bei Nanotest Daten werden bisher keine Daten während der Haltezeiten exportiert. Daher liegen nur Werte für Be- und Entlastung vor, auch wenn Haltezeiten genutzt wurden.

Beispiel für eine **LDD** Datei:

```
11            Number of measurements in the file
296           Total number of points of this (here the first) measurement
152           Number of loading points of this measrement
6.130464e-008 Maximum depth
0
1.079208e-003 Maximum force
```

```
0
0
0
0
 5.838400e-005 , 1.1098e-009        first data line
```

Beispiel für eine **TXT** Datei:

```
-0.586156      0.030000      0.000000
-0.470559      0.032653      0.027471
0.003750       0.035896      0.061239
-0.858181      0.038695      0.087904
2.383851       0.041162      0.111376
```

9.9 CSM NHT-Daten

Es können nur ASCII-Files eingelesen werden. Die Dateierweiterung sollte **TXT** sein. Eine andere Dateierweiterung kann in der Konfiguration auf der Seite *Instrument* eingestellt werden. Der Dateikopf kann beliebig aufgebaut sein. Der Beginn des Datenblocks wird anhand der Zeile erkannt, die die Bedeutung der Spalten beschreibt:

```
Time (s)      Pd (nm)Fn (mN)
```

Die Maßeinheiten müssen (s), (nm) und (mN) sein, andernfalls werden die Werte nicht korrekt angegeben. Es sind beliebig viele Messungen in einem File möglich.

Beispiel für den Beginn eines Datenfiles:

```
______________________________________________________________

Indentation # 1

______________________________________________________________

Indentation

   Method :   Oliver & Pharr

 + Main results

   HIT=4629.3 MPa
   EIT=80.335 GPa
   HV= 428.73  Vickers
   CIT=6.18   %
   RIT=1.29   %

 + Hypothesis

   Poisson's ratio(nu)=      0.17

 + Additional results

   Fmax=      0.11   mN
   hmax=      30.29  nm
   S=  0.0137 mN/nm
   hc= 23.94  nm
   hr= 22.49  nm
   hp= 21.33  nm
   m=  1.14
   Epsilon=   0.81
   Ap= 23022.79      nm²
   Welast=    0.44 pJ
```

```
   Wplast=    0.91 pJ
   Wtotal=    1.36 pJ
   nIT=32.55 %

Measured values
Time (s)      Pd (nm)Fn (mN)
0      0      0
0.2416 5.032  0.0049
0.4832 7.5558 0.0112
0.7247 9.0165 0.0181
```

9.10Daten von einem Zwick-Härteprüfkopf

Daten vom universellen Härteprüfkopf von Zwick müssen im ASCII-Format vorliegen. Daher ist ein Datenexport in der Zwick Software TestXpert vorzunehmen. Das Programm kann mit verschiedenen Ausgabeformaten arbeiten. Seit 2014 steht ein Exportformat zur Verfügung, in dem der Beginn der einzelnen Segmente (Be- und Entlastung, Kriechen) markiert ist und das immer die gleiche Spaltenstruktur hat. Es hat die Dateierweiterung **TXT** und ist zu bevorzugen, sofern es verfügbar ist. Bei älteren TestXpert Softwareversionen lautet die Dateierweiterung **TRA**. Dort können die Spaltenstruktur und auch die Titel der Spalten in verschiedenen Sprachen variieren. Daten in anderen Sprachen als Deutsch oder Englisch sind nicht lesbar.

Beispiel für die Dateistruktur des TXT-Formats:

```
Sample name      Stahlplatte xyz
Sample number    1
Customer         undefined
Comment 1        ---
Comment 2        ---
Indenter type    1
Indenter radius
Opening angle    -


s                     N                     µm
Time                  Force                 Displacement          Segment
              0,0003               0,0349               0,5192                  0
              0,0103               0,0369               0,5392
              0,0203               0,0378               0,5591
```

Beispiele für die Dateistruktur des TRA-Formats:

Der Typ der Datenspalte wird durch die Dateikopfzeile erkannt. Dies funktioniert nur für deutsche oder englische Bezeichnungen.

Version 1

```
"Prüfzeit";"Traversenwegaufnehmer";"Eindringtiefe";"Standardkraft"
"s";"µm";"µm";"N"
-7.81246e-005;1.56683e-006;0.308276;0.031949
0.00992187;1.56683e-006;0.308276;0.0320273
0.0299219;0.0409373;0.348271;0.0327634
0.0399219;0.0409373;0.348272;0.0325598
```

Version 2

```
Standardkraft;   Standardweg;      Prüfzeit
 3.333215e-002; 4.325458e-007;-2.148440e-004
 7.650584e-002; 9.994958e-002; 9.785156e-003
 1.029973e-001; 9.991835e-002; 2.978516e-002
```

Version 3

```
$Fließkurve Messing .ZPV
Anzahl Zyklen/Stufen:                   5
Maximale Prüfkraft:                     30.0166 N
Geschwindigkeit Belastung:              0.5 N/s
Geschwindigkeit Entlastung:             0.5 N/s
$
      Prüfzeit  Eindringtiefe  Standardkraft
 4.882812e-006  4.893224e-002  4.281736e-002
 2.000488e-002  8.885043e-002  5.928558e-002
 4.000488e-002  1.087932e-001  7.081333e-002
```